

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**ESTUDIO TÉRMICO Y AERODINÁMICO DE MOTOCICLETA
ELÉCTRICA DE COMPETICIÓN**



Memoria y Anexos

Autor: Mathias Fortuna
Director: Ricardo Torres Camara
Convocatoria: Junio 2018

Resumen

Este trabajo desarrolla un estudio aerodinámico y térmico de una motocicleta eléctrica de competición del campeonato de MotoStudent. Dicho estudio se ha realizado mediante la utilización de simulaciones de mecánica de fluidos y transferencia de calor, utilizando, principalmente, el programa Comsol Multiphysics®.

Comenzará comentando las normativas que limitan al proyecto, se detallarán algunas características de la moto para entrar en tema y también se explicarán, brevemente, los fundamentos teóricos utilizados en el trabajo. Luego, desarrolla el procedimiento que fue utilizado para llegar a las simulaciones, la generación de los modelos, nombrando las dificultades enfrentadas, para finalizar con las soluciones adoptadas.

Se incluye el análisis del carenado, el pack de baterías, el inversor y el motor. También incorpora un breve cálculo sobre el costo computacional y sobre cuestiones ambientales, útiles a la hora de planificar un estudio como el efectuado.

Resum

Aquest treball desenvolupa un estudi aerodinàmic i tèrmic d'una motocicleta elèctrica de competició del campionat de MotoStudent. Aquest estudi s'ha realitzat mitjançant l'ús de simulacions de mecànica de fluids i transferència de calor, utilitzant principalment, el programa Comsol Multiphysics®.

Començarà comentant la normativa que limita el projecte, es detallen algunes característiques de la moto per entrar en matèria i també s'explicaran breument, els fonaments teòrics utilitzats en el treball. Després, desenvolupa el procediment que s'ha fet servir per arribar a les simulacions, la generació de models, enumerant les dificultats trobades, per finalitzar amb les solucions adoptades.

S'inclou l'anàlisi del carenat, el "battery pack", l'inversor i el motor. També incorpora un breu càlcul sobre el cost computacional i sobre qüestions medioambientals, útils a l'hora de planificar un estudi com aquest.

Abstract

This work develops an aerodynamic and thermal study of an electric racing motorcycle for the Motostudent competition, based on fluid mechanics and heat transfer simulations, using mainly the Comsol Multiphysics software.

First, the applicable regulations in this project will be exposed and some general properties of the motorcycle. The theoretical principles used in the work will also be briefly explained.

Then the method that has been used to achieve the simulations will be explained, naming the adversities encountered, to conclude with the final solutions.

It includes simulations on the fairing, the battery pack, the inverter and the engine. It also incorporates a concise analysis on the computational cost and the scalability of this project, useful when planning a study like the one carried out.

Agradecimientos

Este trabajo no es solo producto del gran esfuerzo del autor sino que de muchas personas más.

Primero quiero agradecer a mi madre que fue la persona que hizo posible mi intercambio y me motivó a seguir este camino.

Agradezco fuertemente a todo el equipo de ePowered Racing, por permitirme entrar al equipo siendo un alumno de intercambio y por tener la confianza en mí durante este tramo. Aquí hay futuros ingenieros que vienen trabajando hace mucho tiempo y que hicieron que la moto sea una realidad. Especialmente quiero nombrar a Sergio Luis Álvarez Sánchez que fue mi compañero en largas traspasadas y si no fuera por sus habilidades de dibujante en CAD el diseño no es lo que sería. Además no puedo dejar atrás a Joan Ferrao, Marc Llusà, Nacho Sunyer, Pau Llanes, Iván Calderero y Conrad Ferrer, piezas esenciales del proyecto.

Por último quiero nombrar a Ricardo Torres, el tutor de este trabajo, por incentivarme a seguir adelante con esta temática y verme el potencial que me vio.



Glosario

- 2D: Dos dimensiones
- 3D: Tres dimensiones
- Battery Pack: Contenedor de celdas de la batería
- C_d : Coeficiente de resistencia al avance
- CFD: Dinámica de Fluidos Computacional
- C_L : Coeficiente de sustentación
- Clúster: Conjunto de computadoras conectadas por una red de alta velocidad que se comportan como uno
- Drag: Arrastre
- Dummy: Maniquí
- Lift: Sustentación
- MotoGP: Campeonato del Mundo de Motociclismo
- NS: Navier-Stokes
- PDE: Ecuaciones Diferenciales Parciales.
- Powertrain: Tren motriz
- Quickshifter: Sistema de cambio rápido
- RAM: Memoria de Acceso Aleatorio
- Render: Proceso de gráficos por computadora para obtención de imágenes en dos dimensiones
- Solver: Programa por computadora para resolver ecuaciones o sistemas de ecuaciones
- TPS: Sensor de posición del acelerador.
- Wall Functions: Funciones de pared

Símbolos de Ecuaciones

- **A** Área frontal
- **c** Velocidad del sonido
- **F** Fuerza
- **F_d** Fuerza de resistencia al avance
- **Kn** Número de Knudsen
- **Ma** Número de Mach
- **p** Presión
- **Re** Número de Reynolds
- **t** Tiempo
- **u** Velocidad
- **U_∞** Velocidad del flujo sin perturbaciones
- **u_t** Velocidad tangencial
- **λ** Coeficiente de camino libre
- **μ** Viscosidad dinámica
- **ν** Viscosidad cinemática
- **ρ** Densidad
- **τ_w** Esfuerzo viscoso



Índice de Figuras

Figura 3.1.1: Logo Motostudent. Fuente: Motostudent	5
Figura 3.1.2: Mapa de Motorland Aragón. Fuente: Motostudent	5
Figura 3.2.1: Captura Reglamento MotoStudent 1	6
Figura 3.2.2: Captura Reglamento MotoStudent 2	6
Figura 3.2.3: Captura Reglamento MotoStudent 3	6
Figura 3.2.4: Captura Reglamento MotoStudent 4	7
Figura 3.2.5: Captura Reglamento MotoStudent 5	7
Figura 3.2.6: Captura Reglamento MotoStudent 6	7
Figura 3.2.7: Captura Reglamento MotoStudent 7	7
Figura 3.2.8: Captura Reglamento MotoStudent 8	8
Figura 3.3.1: Render en Siemens NX	9
Figura 3.3.1: Foto del motor	9
Figura 3.5.1: Foto del inversor	11
Figura 3.6.1: Foto celdas empleadas	11
Figura 3.6.2: Logo Albufera Energy Storage	11
Figura 3.6.3: Diseño del battery pack en Siemens NX	12
Figura 3.6.4: Foto del prototipo de battery pack (no definitivo)	12
Figura 3.7.1: Logotipo de Comsol Multiphysics®. Fuente: Web de Comsol	13
Figura 3.7.2: Logotipo de Siemens. Fuente: Web de Siemens	13
Figura 3.9.1: Esquema de flujo del procedimiento utilizado	15
Figura 4.2.1: Diagrama de flujo solver acoplado. Fuente: Comsol Blogs	21

Figura 4.2.2: Diagrama de flujo solver segregado. Fuente: Comsol Blogs	22
Figura 4.3.1: Esquema lift y drag. Fuente: Comsol Blog	24
Figura 5.1.1: Diseño en CAD a partir de foto de Moto 3	26
Figura 5.1.2: Importación del Carenado en Comsol	27
Figura 5.1.3: Simulación Aerodinámica 1	27
Figura 5.1.4: Fotos varias de canalizaciones de MotoGP. Fuente: MotoGP	28
Figura 5.1.5: Diseño en CAD de mejoras aerodinámicas propuestas 1	29
Figura 5.1.6: Diseño en CAD de mejoras aerodinámicas propuestas 2	29
Figura 5.1.7: Simulación aerodinámica de mejora - Estudio de presiones	30
Figura 5.1.8: Simulación aerodinámica de mejora - Estudio de velocidades y líneas de corriente	30
Figura 5.1.9: Modelado en CAD del Piloto Simplificado Acoplado a la Moto	31
Figura 5.1.10: Túnel de viento virtual en Comsol	32
Figura 5.1.11: Introducción de datos en Comsol	32
Figura 5.1.12: Mallado simulación de referencia	33
Figura 5.1.13: Simulación de referencia - Velocidades	34
Figura 5.1.14: Simulación de referencia - Líneas de corriente (diámetro expresa energía cinética de turbulencia y color velocidades) y vectores velocidad en distintos planos	34
Figura 5.1.15: Primer modelo hecho con sólidos	35
Figura 5.1.16: Elementos de la moto	36
Figura 5.1.17: Elementos de la moto con piloto acoplada	37
Figura 5.1.18: Detalles del diseño del carenado con la piloto	39
Figura 5.1.19: Render de piezas del carenado	39
Figura 5.1.20: Render de la moto completa	40

Figura 5.1.21: Componentes originales del diseño de la EPR01 _____	41
Figura 5.1.22: Detalle componentes a simplificar EPR01 _____	41
Figura 5.1.23: Componentes simplificados para simulación _____	42
Figura 5.1.24: Modelo CAD simplificado para simulación _____	42
Figura 5.1.25: Modelo CAD importado a Comsol _____	43
Figura 5.1.26: Herramientas Comsol _____	43
Figura 5.1.27: Detalle ruedas tapadas _____	44
Figura 5.1.28: Túnel de viento virtual - Detalle dimensiones _____	44
Figura 5.1.29: Menú de "Virtual Operations" de Comsol _____	45
Figura 5.1.30: Diferencia entre caras originales (arriba) y modificadas (abajo) _____	46
Figura 5.1.31: Detalle del mallado de la quilla original (arriba) y modificada (abajo) _____	47
Figura 5.1.32: Detalle del mallado de la rueda original (arriba) y modificada (abajo) _____	47
Figura 5.1.33: Detalle del mallado del codo de la piloto original (arriba) y modificada (abajo) ____	48
Figura 5.1.34: Detalle del mallado de la moto original (arriba) y modificada (abajo) _____	48
Figura 5.1.35: Definiciones en Comsol _____	50
Figura 5.1.36: Primer mallado de la simulación final _____	50
Figura 5.1.37: Mallado final _____	51
Figura 5.1.38: Mallado final - Detalle 1 _____	52
Figura 5.1.39: Mallado final - Detalle 2 _____	53
Figura 5.1.40: Simulación final - Vectores velocidad en el plano de corte y líneas de corriente. Color indica velocidad en m/s _____	54
Figura 5.1.41: Simulación final - Líneas de corriente. Color indica velocidad en m/s _____	54
Figura 5.1.42: Simulación final - Velocidades en el plano central - Color indica velocidad en m/s	54

Figura 5.1.43: Simulación final - Líneas de corriente. Color indica velocidad en m/s y diámetro indica energía cinética turbulenta _____	55
Figura 5.1.44: Simulación final - Isobaras. Color indica presión en Pas _____	55
Figura 5.2.1: Ubicación y disposición motor en EPR01 _____	59
Figura 5.2.2: Simulación cualitativa sin considerar las aletas _____	60
Figura 5.2.3: Simulación considerando las aletas y la turbulencia _____	61
Figura 5.2.4: Elementos definidos para ensayo aerodinámico _____	62
Figura 5.2.5: Simulación aerodinámica motor - Velocidades _____	62
Figura 5.2.6: Simulación aerodinámica motor - Presiones _____	63
Figura 5.2.7: Definición adicional para estudiar la refrigeración _____	63
Figura 5.2.8: Simulación térmica del motor _____	64
Figura 5.2.9: Ducto de redireccionamiento de Aire _____	65
Figura 5.2.10: Simulación fluidodinámica de ducto con condición de caudal - Velocidades _____	66
Figura 5.2.11: Simulación fluidodinámica de ducto con condición de presión - Velocidades _____	67
Figura 5.2.12: Simulación fluidodinámica de ducto con condición de presión - Presiones _____	67
Figura 5.2.13: Simulación fluidodinámica y térmica de ducto con condición de presión – Temperaturas _____	68
Figura 5.3.1: Evolución de la temperatura respecto al tiempo en descarga - Celdas _____	69
Figura 5.3.2: Modelo CAD de la caja del battery pack con ductos _____	70
Figura 5.3.3: Detalle del modelo en CAD de los ductos agujereados del battery pack _____	70
Figura 5.3.4: Modelo CAD del battery pack simplificado para simulación _____	71
Figura 5.3.5: Simulación aerodinámica ductos battery pack: izquierda vista en corte, derecha vista 3D _____	72
Figura 5.4.1: Modelo 2D del inversor en Comsol _____	74

Figura 5.4.2: Modelo 2D del inversor en Comsol - Detalle _____ 75

Figura 5.4.3: Simulación térmica del inversor _____ 75

Índice de Tablas

Tabla 3.4.1: Características motor eléctrico	10
Tabla 3.5.1: Características del inversor	11
Tabla 5.2.1: Throttle Position Sensor vs Tiempo de Motorland Aragón	57
Tabla 5.2.2: Pérdidas estimadas Motor en Motorland Aragón	58
Tabla 5.2.3: Pérdidas en el motor	58
Tabla 5.4.1: Cálculo de potencia perdida - Inversor	73
Tabla 5.4.2: Cálculo de potencia media perdida - Inversor	73
Tabla 5.4.3: Simulación del calentamiento del inversor	76
Tabla 5.5.1: Comparación tiempo y RAM entre clúster y computadora normal	77
Tabla 5.5.1: Cálculo del impacto ambiental del proyecto	79
Tabla 5.5.1: Cálculo de costo del proyecto	82



Índice

RESUMEN	I
RESUM	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	V
GLOSARIO	VII
SÍMBOLOS DE ECUACIONES	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XV
1. PREFACIO	1
1.2. Origen del trabajo	1
1.3. Motivación.....	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Objetivos del trabajo.....	3
2.2. Alcance del trabajo.....	3
2.3. Conocimientos Previos.....	4
3. INFORMACIÓN GENERAL	5
3.1. Organización: MotoStudent	5
3.2. Normativa	6
3.3. Motocicleta: EPR01 - Especificaciones	9
3.4. Motor Eléctrico.....	9
3.5. Inversor	10
3.6. Celdas y Battery Pack	11
3.7. Programas Utilizados	13
3.7.1. Comsol Multiphysics®	13
3.7.2. Siemens NX.....	13
3.8. Hardware Utilizado	14
3.9. Procedimiento Utilizado	14
4. BASE TEÓRICA	16

4.1.	Mecánica de Fluidos	16
4.1.1.	Ecuaciones de Navier Stokes	16
4.2.	Método de los Elementos Finitos (FEM)	19
4.2.1.	Métodos de Resolución	19
4.3.	Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	22
4.3.1.	Estudio de Turbulencia	23
4.3.2.	Cómputo de Lift y Drag	24
5.	DESARROLLO	26
5.1.	Simulación Aerodinámica – Carenado	26
5.1.1.	Etapas Iniciales	26
5.1.2.	Propuesta de Mejora Aerodinámica	28
5.1.3.	Simulación de Referencia	31
5.1.4.	Etapas Intermedias	35
5.1.5.	Simulación y Diseño Final	36
5.2.	Simulación Fluido Térmica – Motor	57
5.2.1.	Cálculo: Calor a Disipar	57
5.2.2.	Planteo	58
5.2.3.	Simulación 2D	59
5.2.4.	Simulación 3D	61
5.2.5.	Conclusiones	64
5.2.6.	Simulaciones Adicionales	64
5.3.	Simulación Fluido Térmica – Battery Pack	69
5.3.1.	Prueba Realizada	69
5.3.2.	Desarrollo	69
	Refrigeración a través de ductos verticales	70
5.4.	Simulación Fluido Térmica – Inversor	73
5.4.1.	Cálculo - Calor a disipar	73
5.4.2.	Simulación Realizada	74
5.5.	Costo Computacional	77
6.	ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL	79
7.	PRESUPUESTO	81
	CONCLUSIONES	83
	Futuro	83
	BIBLIOGRAFÍA	85

ANEXO A: DATASHEETS **86**

A1. Motor	86
A2. Celdas	101
A3. Inversor	102

ANEXO B: PLANOS **113**

B1. Moto General	113
B2. Colín	114
B3. Comprobación de Cotas.....	115



1. Prefacio

1.2. Origen del trabajo

Este trabajo nace con mis ansias de poner en práctica los conocimientos que fui adquiriendo durante la carrera, sumado a la posibilidad de participar en un equipo de la Escola de Enginyeria de Barcelona Est (EEBE) en la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

El equipo del cual formo parte se llama ePowered Racing y nuestro objetivo es diseñar una motocicleta eléctrica capaz de competir en el circuito de Motorland en Aragón, cumpliendo con las normativas impuestas por la organización de MotoStudent.

Mis aportes principales en el equipo se tratan de Aerodinámica y Refrigeración, al departamento que ingresé, pero también la experiencia fue útil para aprender a trabajar con gente de otras disciplinas, tratar con empresas y poder hacer pruebas reales.

1.3. Motivación

La formación que obtuve, principalmente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FI UBA), sumada a mi experiencia en la UPC, me dio muchas opciones sobre la cuál hacer mi Trabajo de Fin de Grado, aunque hubo un área que me atrajo fuertemente que fue la de Simulación en Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor.

Así mismo, mi fanatismo por los vehículos de competición hizo que la aerodinámica estuviera siempre cerca de mis intereses.

Ver la oportunidad que tuve de unir la simulación con la mecánica de fluidos y la aerodinámica, me hizo no dudar en comenzar a estudiar y trabajar sobre lo que expongo en este trabajo, a pesar de saber que era un campo complejo y en el cual me tendría que familiarizar primero.

2. Introducción

2.1. Objetivos del trabajo

El principal objetivo de este trabajo es diseñar un carenado que cumpla con los requisitos térmicos y optimice la aerodinámica de la moto con el fin de reducir su drag. Todo lo anterior dicho, siempre teniendo en consideración los límites establecidos por los demás factores, ya sean, dimensionales, normativa, tiempo o costo. No hay que dejar de lado que este proyecto no es ficticio en lo más mínimo, sino que se va a materializar en una moto construida para julio del 2018.

Además, veo como objetivos, tanto del trabajo, como con el equipo:

- Mejorar la comunicación y el trabajo en equipo para poder terminar con el mejor diseño posible y obtener los mejores resultados en la competición.
- Crear un modelo sencillo para realizar las simulaciones y obtener resultados útiles, tanto para otras simulaciones, sino que también orientativos para cualquiera que lea el trabajo.
- Dominar el uso de los programas de CAD y simulación, en este caso el Siemens NX y el Comsol. Esta experiencia servirá, luego, para cualquier programa, a la hora de querer diseñar un componente.
- Dejar una base bien documentada sobre el procedimiento a seguir a la hora de realizar este tipo de simulaciones, reflejando las dificultades que tuve que enfrentar tanto como las estrategias que aprendí a lo largo del proceso, que puede servir de base a futuros lectores de este trabajo.

2.2. Alcance del trabajo

Dadas las circunstancias reales de mi condición en el equipo de competición, este proyecto incorpora varios componentes, que podrían ser motivo de un trabajo individual cada uno. A pesar de esto, decidí incorporar todo el trabajo realizado en el equipo, especialmente porque son tareas que se complementan y, por otro lado, creo que cada una sumó poco a poco preparación para mi trabajo final.

Dicho esto, de más está decir que en algunos componentes se ha optado por simplificar los objetos de estudio, de una forma lógica y teniendo en cuenta lo que implicaba cada simplificación. En los siguientes párrafos quedan explicadas algunas, pero las más específicas quedarán junto al capítulo de cada componente.

Las motocicletas, comparadas con los autos, tienen un centro de gravedad bastante alto en relación a la distancia entre ejes. Dado esto, la compresión de suspensión modifica el cabeceo del vehículo en todo momento, cambiando, por lo tanto, el ángulo con el cual la moto se enfrenta a la masa de aire que busca atravesar. A pesar de esto, en este trabajo la suspensión se considera como un elemento rígido, por motivo de la complejidad de diseñar y simular estas condiciones.

Las ruedas de la motocicleta son elementos que empeoran fuertemente el C_d , por lo que cada día se ven más ruedas con el centro cubierto. Por normativas de la competición no se ha podido modificar nada en cuestión a las ruedas. Además, a la hora de la simulación no se toma en cuenta el giro de las ruedas, ya que es un elemento *no modificable* por lo que en cada simulación le añadiría el mismo peso a las variables (aproximadamente), independientemente de los cambios en el carenado, que es en lo que se centra este trabajo.

En cuanto a la refrigeración hay muchos datos de pruebas que no pudimos hacer al momento de escrita esta memoria, por lo que se han tratado de hacer las mejores pruebas y/o estimaciones posibles, pero la verificación final será con la moto construida.

Un aspecto que se ha decidido dejar de lado fue el estudio de vientos laterales. A la hora de evaluar esta cuestión, fue un poco difícil encontrar información al respecto y al preguntarle a expertos del área de la competición en motocicleta nos comentaron que generalmente no se estudian.

2.3. Conocimientos Previos

Dada la extensión de este trabajo he optado por no explicar cuestiones teóricas básicas de la mecánica de fluidos, ni de elementos finitos. Por lo tanto, se espera que el lector ya tenga estos conocimientos. Toda la base teórica que está más aplicada a la temática estará incluida en su respectivo capítulo.

3. Información General

3.1. Organización: MotoStudent

Moto Engineering Foundation & TechnoPark MotorLand promueve la competición internacional de MotoStudent, un desafío entre equipos de estudiantes universitarios alrededor del mundo.



Figura 3.1.1: Logo Motostudent. Fuente: Motostudent

El objetivo para los estudiantes es aplicar el conocimiento adquirido durante sus estudios universitarios en un proyecto industrial real, diseñando, desarrollando y fabricando un prototipo real de una moto de carrea, que será evaluado y testeado en el circuito de la FIM, Motorland Aragón.¹

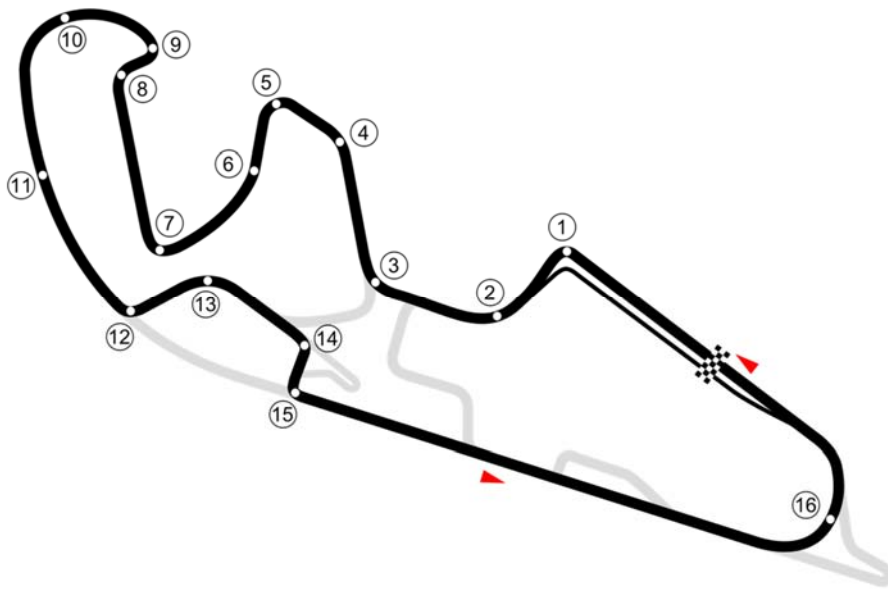


Figura 3.1.2: Mapa de Motorland Aragón. Fuente: Motostudent

La competición cuenta con dos categorías: MotoStudent Petrol (motor de combustión interna) y MotoStudent electric (propulsión 100% eléctrica)

MotoStudent en sí representa un desafío a los estudiantes, los que tienen que demostrar su creatividad y habilidades de innovación para aplicar directamente sus habilidades en ingeniería, compitiendo con otros equipos de otras universidades de alrededor del mundo, durante un periodo de 3 semestres.

3.2. Normativa

En el presente capítulo extraeré las normas que están más relacionadas al trabajo realizado.

Por reglamentación² la motocicleta tiene ciertos **límites dimensionales**:

B.2.1.1 La anchura mínima entre los extremos de los semimanillares debe ser de 450mm.

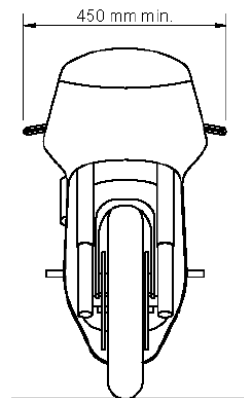


Figura 3.2.1: Captura Reglamento MotoStudent 1

B.2.1.2 El ángulo mínimo de inclinación lateral de la motocicleta sin que ningún elemento de la misma (exceptuando los neumáticos) toque el pavimento debe ser 50°. Dicha medición se realizará con la motocicleta descargada (es decir, sin piloto) pero con todo el equipamiento y líquido para su funcionamiento.

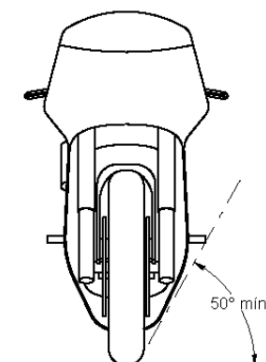


Figura 3.2.2: Captura Reglamento MotoStudent 2

B.2.1.3 La distancia libre al pavimento con la motocicleta en posición vertical ha de ser de un mínimo de 100mm en situación de reposo. Esta medición se realizará con la moto descargada (es decir, sin piloto), pero con todo el equipamiento y líquidos para su funcionamiento (incluyendo 1 litro de gasolina en las motocicletas de la Categoría MotoStudent Petrol).

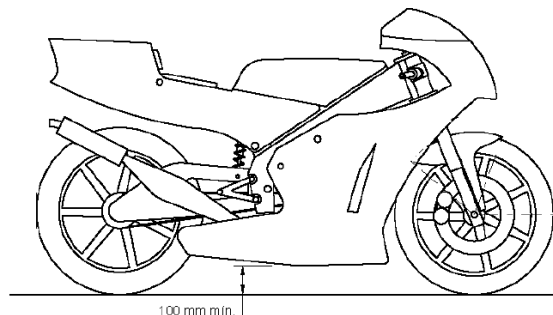


Figura 3.2.3: Captura Reglamento MotoStudent 3

B.2.1.4 Límite frontal: Ningún elemento de la motocicleta podrá sobrepasar la vertical frontal trazada tangencialmente a la circunferencia exterior del neumático delantero.

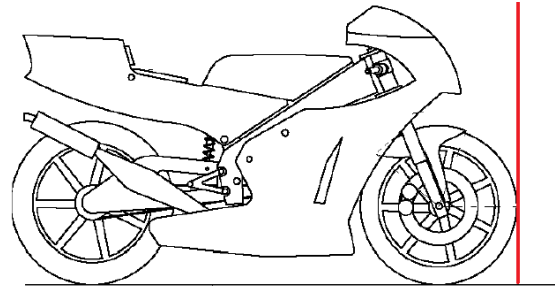


Figura 3.2.4: Captura Reglamento MotoStudent 4

B.2.1.5 Límite posterior: Ningún elemento de la motocicleta podrá rebasar la línea tangente vertical trazada a la circunferencia exterior del neumático trasero.

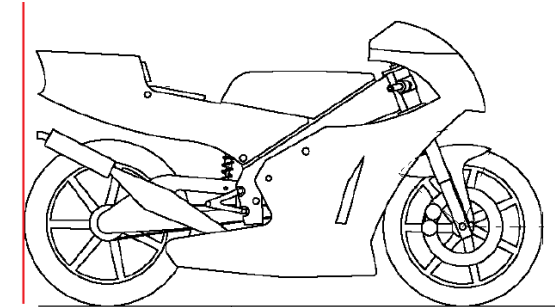


Figura 3.2.5: Captura Reglamento MotoStudent 5

B.2.1.7 La anchura máxima del asiento no debe rebasar los 450mm. No podrá sobresalir de esa anchura ningún otro elemento de la motocicleta del asiento hacia detrás, excepto el sistema de escape para motos de la categoría “MotoStudent Petrol”.

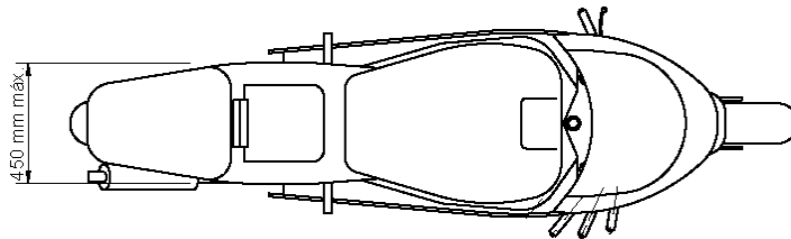


Figura 3.2.6: Captura Reglamento MotoStudent 6

B.2.1.8 La anchura máxima del carenado será de 600mm.

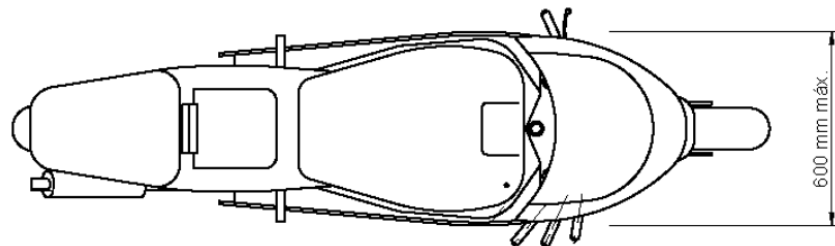


Figura 3.2.7: Captura Reglamento MotoStudent 7

B.2.1.9 Entre la altura del asiento y la parte más elevada del colín la cota máxima será de 150mm.

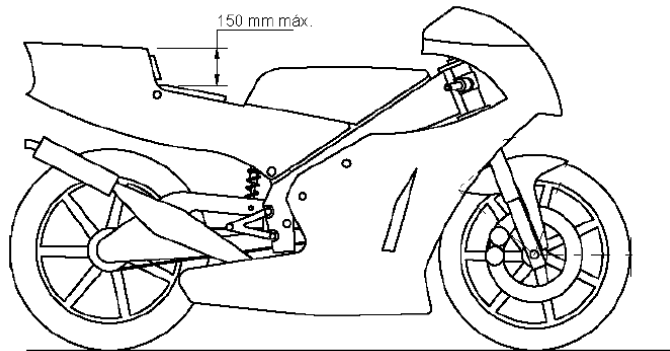


Figura 3.2.8: Captura Reglamento MotoStudent 8

Además, en cuanto al carenado dice:

- Todos los bordes y acabados del carenado deben ser redondeados, el radio mínimo es 1 mm.
- El carenado no podrá cubrir lateralmente al piloto a excepción de los antebrazos (esta excepción únicamente en posición de mínima resistencia).
- El carenado puede estar fabricado con cualquier tipo de material, no hay restricciones en este apartado.
- No es obligatorio el uso de guardabarros. En el caso de montar guardabarros, éste no puede cubrir más de 135° de la circunferencia del neumático medido desde la parte posterior del neumático con origen del ángulo en la horizontal que pasa por el eje de la rueda.
- La llanta posterior no se podrá cubrir en más de 180°.

Con respecto a la refrigeración el reglamento es libre, solo aclara que en caso de que sea por agua, ésta no puede llevar aditivos y que la quilla debe soportar 1 litro de fluido.

3.3. Motocicleta: EPR01 - Especificaciones

- Potencia máxima: 32 kW
- Potencia nominal: 12 kW
- Baterías: Litio-Cobalto Óxido (Litio Polímero)
- Voltaje de Power Train: 110 V
- Batalla: 1285 mm
- Longitud: 1873 mm
- Ancho: 640 mm
- Altura: 1180 mm
- Despeje: 100 mm
- Peso: 137 kg
- Chassis: Multitubular de acero AISI 4130
- Carenado y subchassis: Fibra de Carbono
- Caja de velocidades: tipo quickshifter de dos velocidades (sin embrague)
- Velocidad máxima teórica: 209,4 km/h
- Par máximo a rueda teórico: 614 Nm.

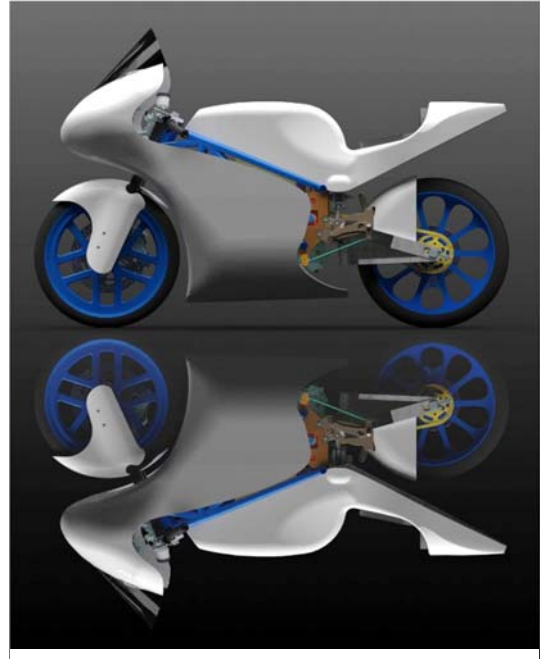


Figura 3.3.1: Render en Siemens NX

3.4. Motor Eléctrico

El motor eléctrico ME-MS1718 utilizado en la motocicleta es suministrado por la organización de la competencia y por regulaciones no se puede modificar en lo más mínimo. Esto presentó una primera dificultad, al ver que las aletas del motor estaban dispuestas de una forma ineficiente para la refrigeración del mismo.



Figura 3.3.1: Foto del motor

Características Destacadas¹:

TIPO	Motor eléctrico RFPM (Brushless)
MÁXIMAS RPM	8.000 RPM
POTENCIA NOMINAL/MÁXIMA	12kW/32kW
PAR NOMINAL/MÁXIMO	32Nm/120Nm
REFRIGERACIÓN	Por aire
MÁXIMA TEMPERATURA	140°C
PESO	21.4 kg
EFICIENCIA	92%
POLOS	10
PROTECCIÓN CONTRA EL AGUA	IP65

Tabla 3.4.1: Características motor eléctrico

3.5. Inversor

El inversor empleado es un SEVCON Gen 4 Size 6. Dentro de los parámetros a destacar tenemos²:

VOLTAJE NOMINAL DE LA BATERÍA	70 a 80 VDC
VOLTAJE MÁXIMO DE OPERACIÓN	116 VDC
VOLTAJE MÍNIMO DE OPERACIÓN	39.1 VDC
CORRIENTE PICO (2MIN)	550 A

¹ Extraído del Datasheet del motor encontrado en el anexo 1A1 Motor, página 93

² Extraído de Datasheet del inversor encontrado en el anexo 1A3 Inversor, página 109

CORRIENTE BOOST (10 SEG)	660 A
CORRIENTE CONSTANTE (60MIN)	260 A

Tabla 3.5.1: Características del inversor

El inversor es el componente de electrónica de potencia que permite transformar la corriente continua que suministra el battery pack a corriente alterna trifásica.

En este caso, además de ser un inversor, también es un controlador, por lo que permite regular la velocidad y el par suministrado por el motor, además mide múltiples datos útiles para el control.



Figura 3.5.1: Foto del inversor

3.6. Celdas y Battery Pack

Las Celdas empleadas son las GTK P1190190S suministradas por Albufera Energy Storage, nuestro principal patrocinador desde el comienzo del proyecto.



Figura 3.6.2: Logo Albufera Energy Storage

El Battery Pack consta de una configuración de 2 celdas en paralelo seriadas 26 veces (52 celdas). El voltaje máximo del acumulador alcanza los 109,2 V y 44 Ah de capacidad a plena carga, permitiendo suministrar hasta 500 A. Las celdas se conectan en su configuración correspondiente mediante el apriete de un sándwich formado por cobre, los bornes de las celdas y fibra de vidrio donde se tenga que proporcionar aislamiento. Las celdas reposan sobre una serie de placas que sostienen cada paralelo de celdas, y así se evita que las celdas inferiores soporten el peso de todas las demás celdas. Además, limitan sus movimientos relativos. Todo el conjunto se encaja dentro del contenedor general, una caja compuesta de un sándwich de dos pieles de 1 mm de grosor de fibra de aramida y un núcleo también de aramida en forma de panel de abeja de 5 mm de grosor.



Figura 3.6.1: Foto celdas empleadas

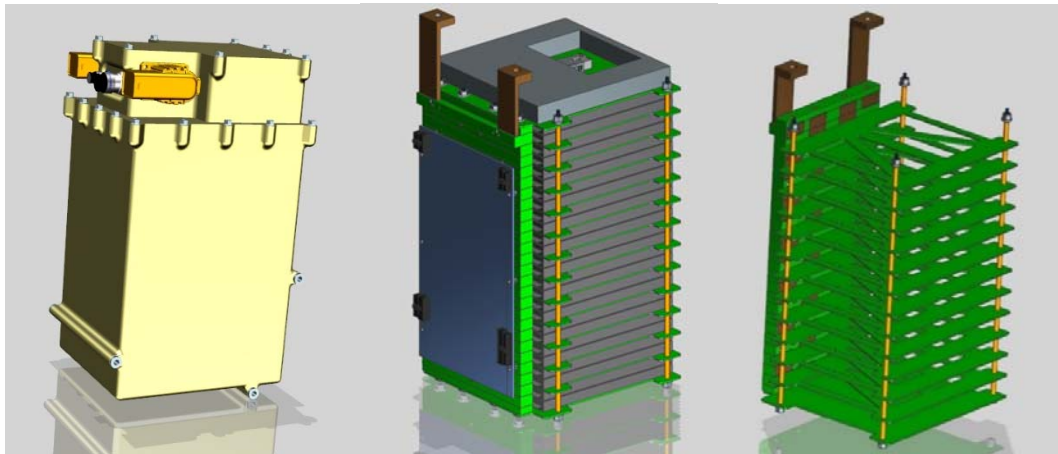


Figura 3.6.3: Diseño del battery pack en Siemens NX



Figura 3.6.4: Foto del prototipo de battery pack (no definitivo)

3.7. Programas Utilizados

3.7.1. Comsol Multiphysics®



Figura 3.7.1: Logotipo de Comsol Multiphysics®. Fuente: Web de Comsol

Comsol Multiphysics® es un programa de plataforma de uso general para modelar aplicaciones ingenieriles. Se puede usar el módulo central por sí solo o expandir su funcionalidad con cualquier combinación de módulos adicionales para simular diseños y procesos basados en el comportamiento ingenieril de electromagnetismo, mecánica estructural, acústica, mecánica de fluidos, transferencia de calor y química. Permite combinar tantos módulos como sean necesarios en un solo modelo.

Este programa fue utilizado principalmente para realizar las simulaciones, aprovechando que tiene la posibilidad de importar archivos en el formato que trabaja el Siemens NX.

3.7.2. Siemens NX



Figura 3.7.2: Logotipo de Siemens. Fuente: Web de Siemens

Siemens NX es un programa centrado en el diseño y la modelización en 3D. Además, permite realizar renderizados de buena calidad, simulaciones físicas, tiene módulos de CAM y muchas más cosas.

Este programa fue utilizado principalmente para realizar los modelados en 3D, esto tiene varios motivos, el principal es que todo el equipo trabaja con este software debido a que tenemos licencias otorgadas por Siemens y además porque es un programa muy utilizado en el ámbito industrial y permite realizar muchas cosas.

A pesar de que el Siemens NX tiene módulos para realizar simulaciones de CFD, e incluso acoplados con transferencia de calor, se tomó la decisión de usar principalmente el Comsol en este trabajo.

Por la experiencia adquirida, el NX es un gran programa de CAD, tiene muchas herramientas de gran utilidad, pero a la hora de realizar las simulaciones el mallador de Comsol supera abismalmente. Además, NX no permite seleccionar qué modelos o solvers utilizar, mientras que el programa utilizado sí.

3.8. Hardware Utilizado

- Workstation 2009:
 - 2 Intel Xeon E5520 (8 núcleos a 2,26 GHz nominales)
 - 32 GB de RAM (1066MHz)
- Clúster HP:
 - 4 Intel Xeon Gold 6130 (64 núcleos a 2,10 GHz nominales)
 - 258 GB de memoria RAM

3.9. Procedimiento Utilizado

A la hora de enfrentar los problemas que se plantearon se comenzó con un repaso de los conceptos teóricos que se podían necesitar, pasando luego a la etapa inicial del desarrollo. En el desarrollo se comenzaba con una idea inicial, aplicando algunos conocimientos combinados con soluciones vistas en otros modelos.

Para pasar al diseño final se fueron realizando simulaciones y mediante iteración se fueron probando mejoras posibles para el diseño final, hasta se decidió seguir con un diseño que se llamará **diseño final**.

El procedimiento empleado en el campo de la simulación fue el siguiente:

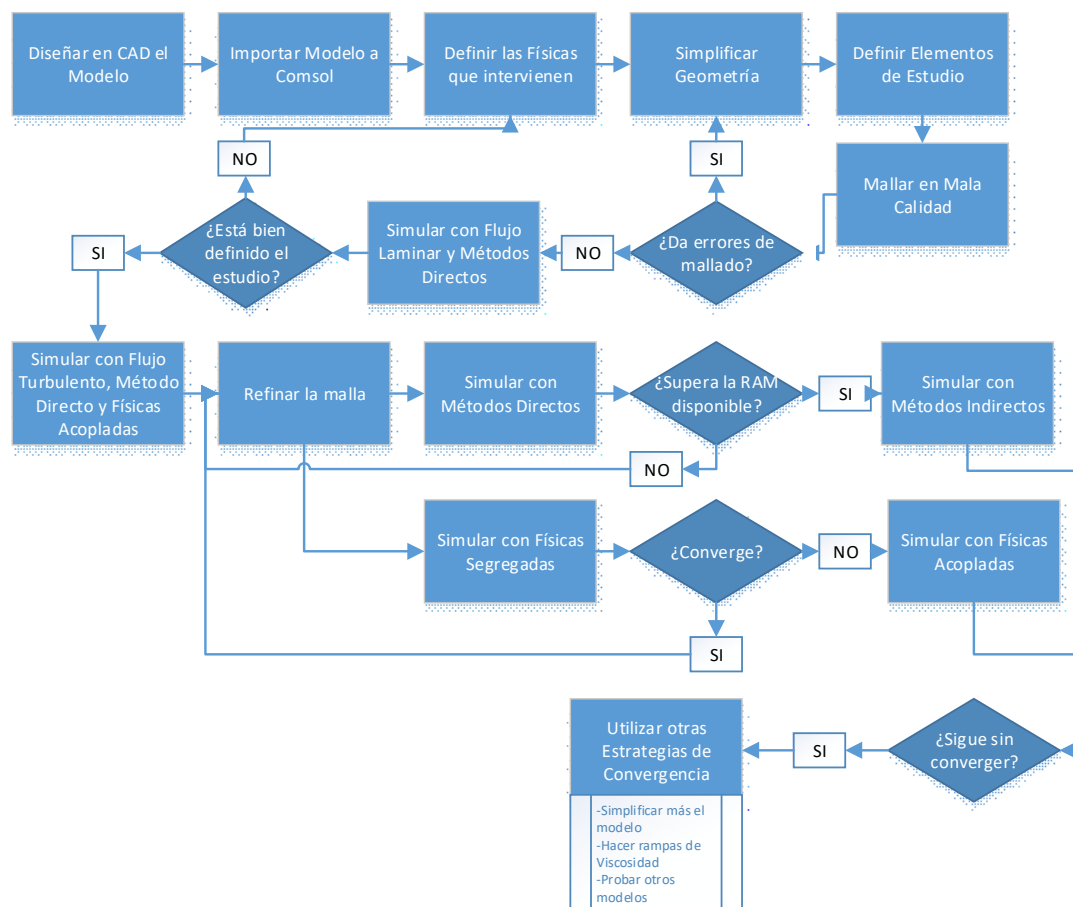


Figura 3.9.1: Esquema de flujo del procedimiento utilizado

4. Base Teórica

Este capítulo intentará resumir un poco la teoría utilizada en este trabajo, a modo de que el lector pueda comprender de dónde proceden las ecuaciones y el desarrollo del trabajo. Así mismo, se ha decidido mantener la brevedad con la espera que el lector tenga los conocimientos previos básicos sobre el campo de este trabajo.

4.1. Mecánica de Fluidos

Las ecuaciones de la mecánica de fluidos no tienen solución general conocida por lo que para obtener soluciones se puede realizar simplificaciones, análisis dimensional o experimentación.

Análisis dimensional

Es una herramienta de análisis de la física en general. La identificación de las variables de influencia, su agrupación en grupos adimensionales, la metodología para optimizar los recursos experimentales, así como compactar los resultados de los ensayos, son algunas de sus características más remarcables. De este análisis se establecen las relaciones de semejanza que permiten la extrapolación de los resultados obtenidos sobre modelos a escala, a prototipos a escala real, aun cuando es imposible, en la práctica, asegurar las condiciones de semejanza total.³

4.1.1. Ecuaciones de Navier Stokes⁴

Las ecuaciones de Navier-Stokes definen el movimiento de los fluidos y pueden ser comparadas con la segunda ley de Newton para la mecánica de fluidos. En el caso de un fluido newtoniano, ésta sería:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) + \mathbf{F} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

(1)
(2)
(3)
(4)

Donde \mathbf{u} es la velocidad del fluido, p es la presión, ρ es la densidad y μ es la viscosidad dinámica del fluido. Los diferentes términos corresponden a las fuerzas de inercia (1), fuerzas de presión (2), fuerzas viscosas (3) y las fuerzas externas al fluido (4). Estas ecuaciones fueron desarrolladas por Navier, Poisson, Saint-Venant y Stokes entre 1827 y 1845.

Para su resolución se utiliza siempre la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes representan la conservación del momento, mientras que las ecuaciones de continuidad representan la conservación de la masa.

Aplicación a la Simulación y el Modelado

Estas ecuaciones son el corazón del modelado de mecánica de fluidos. Resolverlas, para ciertas condiciones de contorno (como entradas, salidas y paredes), predice la velocidad del fluido y la presión en una geometría determinada. Estas ecuaciones solo admiten un número limitado de soluciones analíticas, debido a su complejidad. Es relativamente sencillo resolverlas para un flujo entre dos placas planas paralelas o el flujo en una cañería circular. Para geometrías más complejas es más difícil.

Variaciones de las Ecuaciones

Dependiendo del régimen del régimen de interés, suele ser posible simplificar estas ecuaciones. En otros casos, se requieren aplicaciones adicionales. En el campo de la dinámica de fluidos, los diferentes regímenes de flujo se categorizan utilizando números adimensionales, como por ejemplo el número de Reynolds, o el número Mach.

El número de Reynolds corresponde al coeficiente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Números bajos de número de Reynolds indica flujo laminar, mientras que números altos, un flujo turbulento.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

El número de Mach corresponde al coeficiente entre la velocidad del fluido, U , y la velocidad del sonido en ese fluido, c . Este número mide la compresibilidad del flujo.

$$Ma = \frac{U_{\infty}}{c} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Para flujos incompresibles la ecuación de la continuidad se convierte en:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Debido a la divergencia de la velocidad es igual a cero, podemos remover ese término.

$$-\frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Del término de la fuerza viscosa en la ecuación de NS para el caso del flujo incompresible.

Navier-Stokes para Reynolds Alto – Flujo Turbulento

En estos modelos, donde el número de Reynolds es elevado, las fuerzas inerciales son mucho más grandes que las viscosas. En este tipo de modelos es necesario usar una malla lo suficientemente fina como el tamaño como para tener en cuenta cada remolino y son problemas transitorios por naturaleza.

Realizar este tipo de simulaciones utilizando las ecuaciones de NS está más allá del poder de computación de hoy en día. En cambio, se utiliza la formulación RANS o Reynolds-Averaged Navier-Stokes, la cual hace un promedio de la velocidad y la presión en el tiempo.

Estas ecuaciones promediadas pueden ser calculadas de forma estacionaria con una malla relativamente mala, por lo tanto, reduciendo ampliamente el poder de computación y el tiempo requerido para las simulaciones.

La formulación RANS es la siguiente:

$$\rho(U \cdot \nabla U) + \nabla \cdot \left(\mu_T (\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3} \mu_T (\nabla \cdot U) I \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3} \mu_T (\nabla \cdot U) I \right) + F \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Aquí, U y P son los valores promediados durante el tiempo. El término μ_T representa la viscosidad turbulenta. Los efectos dependientes de los pequeños tiempos en la fluctuación de la velocidad no se resuelven con RANS. El cálculo de la viscosidad turbulenta depende del modelo de turbulencia elegido.

Compresibilidad

La compresibilidad de un flujo se mide a través del número de Mach.

Flujo Incompresible

Cuando el número de Mach es muy bajo está bien asumir que el flujo se comporta como incompresible. Cuando ocurre esto, la densidad se asume constante y la ecuación de continuidad se reduce a $\nabla \cdot u = 0$.

Flujo Compresible

En algunos casos, la velocidad del flujo es lo suficientemente grande para que la densidad y la temperatura tengan cambios importantes en el fluido. Estos cambios son apreciables cuando $Mach > 0,3$, y por lo tanto, el acoplamiento entre la velocidad, presión y temperatura es tan fuerte que las ecuaciones de NS y de continuidad tienen que ser resueltas acopladas y utilizando la ecuación de

energía. Esta última predice la temperatura del fluido, dato necesario para calcular las propiedades que dependen de la temperatura.

Regímenes que no pueden ser calculados con Navier-Stokes

Las ecuaciones de NS son únicamente válidas mientras la longitud física representativa del sistema sea mucho más grande que la media del camino libre de las moléculas que conforman el fluido. En este caso, el fluido se llama un continuum. El coeficiente de camino libre medio, λ , y la escala de longitud representativa, L , es el número de Knudsen:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Las ecuaciones de NS son válidas para $Kn < 0,01$. Para valores de Kn entre 0,01 y 0,1 las ecuaciones se pueden utilizar, pero requieren unas condiciones de borde especiales. Cuando $Kn > 0,1$ ya dejan de ser válidas.

4.2. Método de los Elementos Finitos (FEM)

El desarrollo de las leyes de la física para problemas dependientes del tiempo y del espacio normalmente se expresan en términos de ecuaciones diferenciales parciales (PDEs, en inglés). Para la mayoría de las geometrías y los problemas, estas PDEs no pueden ser resueltas con métodos analíticos. En cambio, se pueden construir aproximaciones a las ecuaciones, típicamente basadas en diferentes tipos de discretizaciones. Estos métodos de discretización aproximan las PDEs con modelos numéricos de ecuaciones, los cuales pueden resolverse utilizando métodos numéricos. Las soluciones de las ecuaciones de modelos numéricos son, en realidad, una aproximación a las soluciones reales de las PDEs. El método de los elementos finitos o FEM es utilizado para calcular este tipo de aproximaciones.⁵

4.2.1. Métodos de Resolución

Métodos Directos

Distintos métodos:

- MUMPS: MULTifrontal Massively Parallel sparse direct Solver (<http://mumps.enseiht.fr/>)
- PARDISO (<https://software.intel.com/en-us/articles/intel-mpi-library-documentation>)
- SPOOLES (<http://www.netlib.org/linalg/spooles/spooles.2.2.html>)

Cualquiera de estos solvers llegará a la misma solución para todos los problemas bien condicionados, lo que sería su mayor ventaja y a veces podrán resolver algunos problemas mal condicionados. Desde

el punto de vista de la solución es irrelevante cuál solver es utilizado, todos van a entregar la misma solución.

En lo que más se diferencian los distintos métodos es en su velocidad relativa. Cualquiera de los tres puede utilizar todos los núcleos de una computadora, pero PARDISO tiende a ser el más rápido y SPOOLES el más lento (pero utilizando menos memoria).

Memoria RAM: Todos los solvers directos utilizan bastante RAM, aunque MUMPS y PARDISO pueden almacenar la solución out-of-core, lo que significa que pueden descargar algo del problema en el disco. Por otra parte, el MUMPS permite la utilización de clústeres para agilizar la computación y utilizar la memoria de varias computadoras.

Métodos Iterativos⁶

Cada método tiene muchas diferencias con el siguiente, pero a grandes rasgos su funcionamiento es bastante similar.

A diferencia de los anteriores, los métodos iterativos se acercan a la solución de una forma gradual. Normalmente el error relativo debería de bajar con el número de iteraciones; siempre que el problema esté bien condicionado. Si la convergencia oscila, normalmente indica que el problema no está bien definido.

El problema converge una vez que el error relativo es menor al establecido en el solver, sin excederse de los límites que permite la computadora de $2.22 \cdot 10^{-16}$ y mayor al número de condición. El error relativo se calcula con respecto a las variables dependientes de cada problema/física.

La principal ventaja de los métodos iterativos es que utilizan poca memoria, pero su principal desventaja es que no siempre convergen con facilidad. Cada física distinta utiliza normalmente distintos solvers, dependiendo de la naturaleza de la ecuación que “gobierne” el problema.

Distintos Planteos de Resolución⁷

En los problemas planteados se utilizan distintas ecuaciones a resolver, como pueden ser, la utilización de las ecuaciones de la mecánica de fluidos y del modelo de turbulencia acoplados, o también la mecánica de fluidos con las ecuaciones de transferencia de calor. Al resolver problemas con distintas físicas, hay distintas formas de encararlos y de acoplar las ecuaciones:

Fully Coupled

En primer lugar, el solucionador totalmente acoplado parte de una conjetura inicial y aplica iteraciones Newton-Raphson hasta que la solución ha convergido. Al resolver un problema de este tipo, obtendrá

un Diagrama de Convergencia, que muestra la estimación del error disminuyendo entre las iteraciones de Newton-Raphson. Idealmente, el error debería reducirse monótonamente si no converge, luego comenzar a investigar aumentando las cargas, las no linealidades o los acoplamientos multifísicos. Este enfoque casi siempre requerirá un solucionador directo más intensivo en memoria para resolver el sistema lineal de ecuaciones en cada paso de Newton-Raphson.

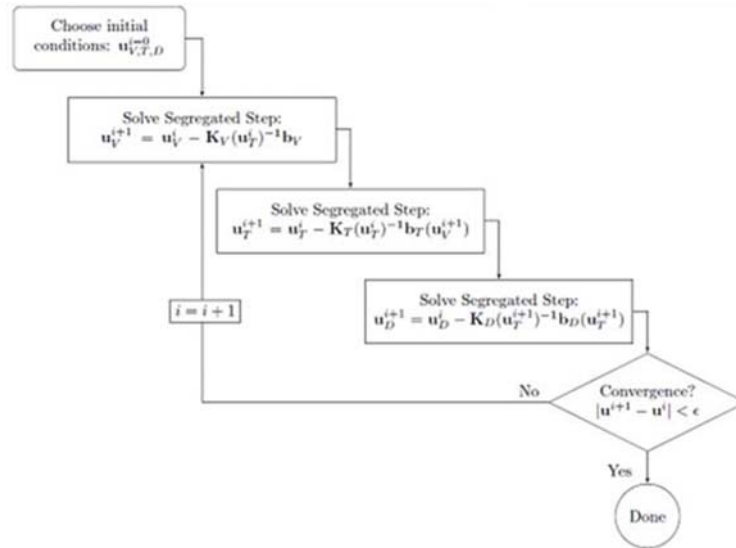


Figura 4.2.1: Diagrama de flujo solver acoplado. Fuente: Comsol Blogs

Segregated

Obtendrá un tipo diferente de diagrama de convergencia para ese problema, que muestra el error asociado con cada física que está resolviendo. Cada uno de las físicas puede usar el solucionador óptimo, ya sea el iterativo directo o el menos intensivo en memoria, para resolver el sistema lineal de ecuaciones. Cada paso segregado puede ser un problema no lineal por sí mismo, y puede resolverse con la tolerancia deseada y con una amortiguación personalizada, según corresponda para la combinación particular de problema de física que se está resolviendo.

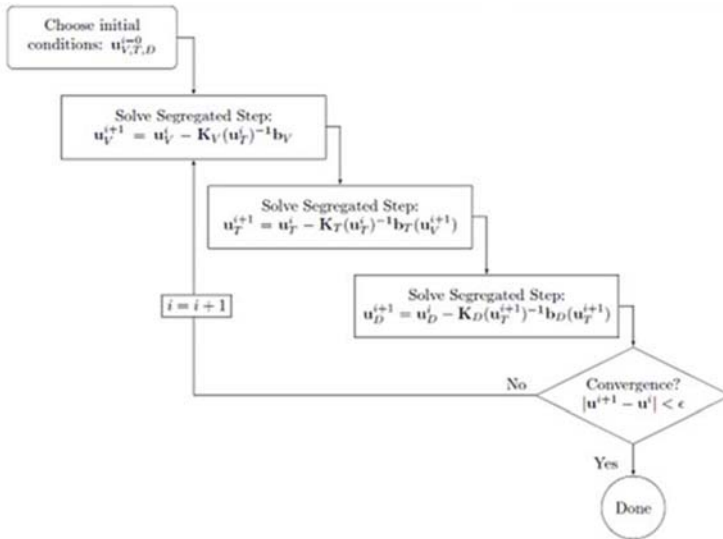


Figura 4.2.2: Diagrama de flujo solver segregado. Fuente: Comsol Blogs

Con este método de solución, obtendrá al menos dos gráficos de convergencia, uno para los solucionadores iterativos posiblemente utilizados en un paso segregado, y un segundo para la convergencia general del enfoque segregado.

Aunque se pueden requerir más iteraciones para el mismo problema, cada ciclo a través del enfoque de solución segregada puede ser mucho más rápido que el paso Newton-Raphson requerido para el enfoque totalmente acoplado. También puede obtener un poco más de información, si solo una o dos físicas no convergen, entonces querrá verificar primero la configuración de estas primeras y no de todo el sistema.

4.3. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La evolución de las computadoras ha permitido la resolución de las ecuaciones del flujo haciendo el uso de las herramientas numéricas que discretizan el dominio de solución espacial y temporalmente.

A pesar de esto, los métodos numéricos y las simulaciones computacionales incorporan siempre un cierto grado de incertidumbre, y no hay que olvidarse de esto a la hora de interpretar los resultados obtenidos.⁸

Dentro de los posibles errores que vemos en CFD están:

- Errores de discretización: intrínseco a cualquier método numérico y son el resultado de discretizar el continuo en un número finito de localizaciones espaciales o nodos.

- Errores en los datos de entrada: desconocimiento exacto de algunas propiedades del flujo y del fluido.
- Errores de modelización: cuando el flujo es complejo e incorpora físicas que no están comprendidas en las ecuaciones utilizadas como turbulencia, flujos multifásicos, etc.

A pesar de esto el CFD presenta grandes ventajas, lo que se ve en la amplia utilización y campos de aplicación distintos en los que se encuentra.

4.3.1. Estudio de Turbulencia^{9 10 11 12}

Para estudiar los flujos turbulentos hay distintos modelos que nos lo permiten. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas, por lo que es muy importante la elección del modelo correcto para cada tipo de estudio que se realice. Éstos modelos fueron desarrollados durante años y mejorados, para utilización en distintos programas.

L-VEL y yPlus

Para calcularla viscosidad en la turbulencia se basa únicamente en los valores de la velocidad local del fluido y la distancia a la pared más cercana. Es el modelo menos intensivo computacionalmente, aunque tiene mala precisión. Es muy útil para hacer aproximaciones sobre flujos internos, especialmente utilizado para análisis de refrigeración en electrónica.

Spalart-Allmaras

Agrega una variable adicional llamada viscosidad de Spalart-Allmaras y no utiliza funciones de pared; resuelve todo el volumen del fluido. No utiliza mucha memoria, especialmente menos que los que resuelven la capa buffer. No es preciso calculando campos que muestran separación de flujo, flujos internos muy complejos o turbulencia de descomposición. Como ventaja, es muy estable y tiene buena convergencia.

Se suele utilizar para analizar capas límites, todo el flujo, pero sin separación, flujos compresibles, aplicaciones aeroespaciales o en automoción (para estudios iniciales).

k-ε

Es el modelo de uso más general. Resuelve dos variables: k ; la energía cinética de turbulencia y ϵ ; la tasa de disipación de la energía cinética. Este modelo requiere de funciones de pared computadas para utilizarlo. Es útil únicamente para flujos totalmente turbulentos.

Es de implementación fácil, rápida convergencia, y muy bueno para flujos externos. Lo malo es que no permite utilizarlo con jets axi-simétricos o con alta separación de flujo. Tiene baja sensibilidad a los gradientes de presión. No es útil para aplicaciones cercanas a las paredes.

Es muy útil para iteraciones iniciales, bueno con flujos externos alrededor de geometrías complejas.

k- ω

Además de resolver k agrega una nueva variable ω , la frecuencia de turbulencia. Tiene mejores resultados en flujos cercanos a la pared, predice la transición (a veces demasiado temprano). Es muy sensible a los valores iniciales, y a veces se procede a hacer las primeras iteraciones con $k-\epsilon$.

Es excelente para capas límites, funciona con gradientes de presión adverso, fuertes separaciones de flujo y jets. Lo malo es que el tiempo requerido para la convergencia es mayor, y es intenso con el uso de memoria. Requiere buena calidad de mallado cerca de las paredes y predice separaciones excesivas.

Su aplicación es mayormente en flujos internos, cañerías, jets y vórtices.

k- ω SST

Lo interesante de este modelo es que combina el $k-\omega$ cerca de la pared y $k-\epsilon$ en el flujo libre. No utiliza funciones de pared. Como ventajas tiene en cuenta el stress del corte turbulento mientras tiene los beneficios del modelo $k-\omega$. Es muy preciso para predecir separación y transición, con buen resultado para flujos libres como en las capas límite.

Lo malo es que no es útil para flujo en vórtices como el $k-\omega$ estándar. Además, requiere una buena resolución del mallado cerca de las paredes. Se suele usar en aerodinámica externa, flujo separados, capas límite y gradientes de presión adversos.

4.3.2. Cálculo de Lift y Drag ¹³

Cuando un flujo pasa alrededor de un cuerpo, le ejercerá una fuerza sobre la superficie. La componente de esta fuerza que es perpendicular a la dirección del flujo se llama lift (o downforce). La componente de la fuerza que es paralela al flujo se llama drag. Esto se puede entender mejor en la Figura 4.3.1.

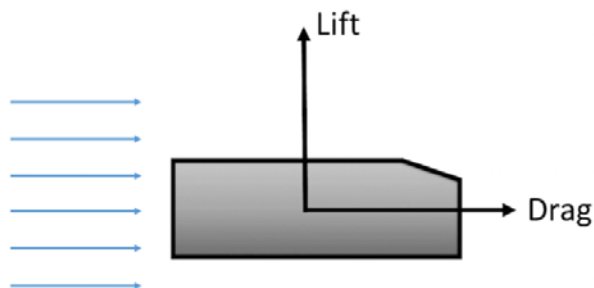


Figura 4.3.1: Esquema lift y drag. Fuente: Comsol Blog

Existen dos principales contribuciones a las fuerzas

de drag y de lift; las fuerzas de presión y las fuerzas viscosas. Las fuerzas de presión, usualmente

referidas como fuerzas de gradiente de presión, es la fuerza generada por la diferencia de presiones a través de la superficie. En cambio, las fuerzas viscosas se generan a partir de la fricción que genera el fluido, que actúa en dirección contraria al flujo. Las magnitudes de estas fuerzas pueden variar significativamente, dependiendo del tipo de flujo y de la geometría. En el caso de un auto o una moto, la fuerza dominante suele ser la de presión.

La fuerza de presión se puede calcular integrando la presión aplicada sobre toda la superficie del cuerpo a estudiar. Por otro lado, podemos obtener la fuerza viscosa a través de:

$$u_T = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Donde u_T es la velocidad tangencial en la pared.

Integrando la fuerza viscosa sobre toda la superficie podemos obtener la fuerza viscosa total. De esta forma, si proyectamos la sumatoria de estas fuerzas en el eje longitudinal tendremos la resistencia al avance y si lo hacemos en el eje vertical, la sustentación o lift.

Una vez que se tiene el valor de esta fuerza se puede llegar al valor del coeficiente de drag a través de la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Siendo F_d la fuerza de resistencia al avance, U_∞ la velocidad del aire y A el área frontal de la geometría.

¿Por qué estudiar el coeficiente de drag en vehículos?

El coeficiente de drag cuantifica la resistencia de un objeto a fluir en su entorno. No es una constante para un cuerpo porque varía con la velocidad y la dirección del flujo, la forma y el tamaño del objeto, de la densidad y la viscosidad del aire. Menor es el coeficiente de drag menor arrastre fluido dinámico ocurre. En un vehículo este factor va directamente relacionado a la eficiencia, al mismo tiempo de que afecta la velocidad punta.

Las motocicletas, por su geometría, son vehículos poco aerodinámicos, pero no por eso se deja de estudiar cómo se puede mejorar este aspecto. En la aerodinámica intervienen el tamaño, la forma, el piloto (y su posición), como elementos principales. Los típicos coeficientes de drag de las motos van de 0,4 a 0,5.¹⁴

5. Desarrollo

5.1. Simulación Aerodinámica – Carenado

5.1.1. Etapas Iniciales

Para comenzar con el diseño del carenado se empezó con un diseño bastante sencillo para realizar simulaciones de referencia y desde ahí empezar a probar modificaciones que resultarán en mejoras o no.

El diseño del carenado se hizo utilizando de referencia varios diseños de Moto 3 y a partir de la generación de superficies a partir de splines se realizó lo siguiente:

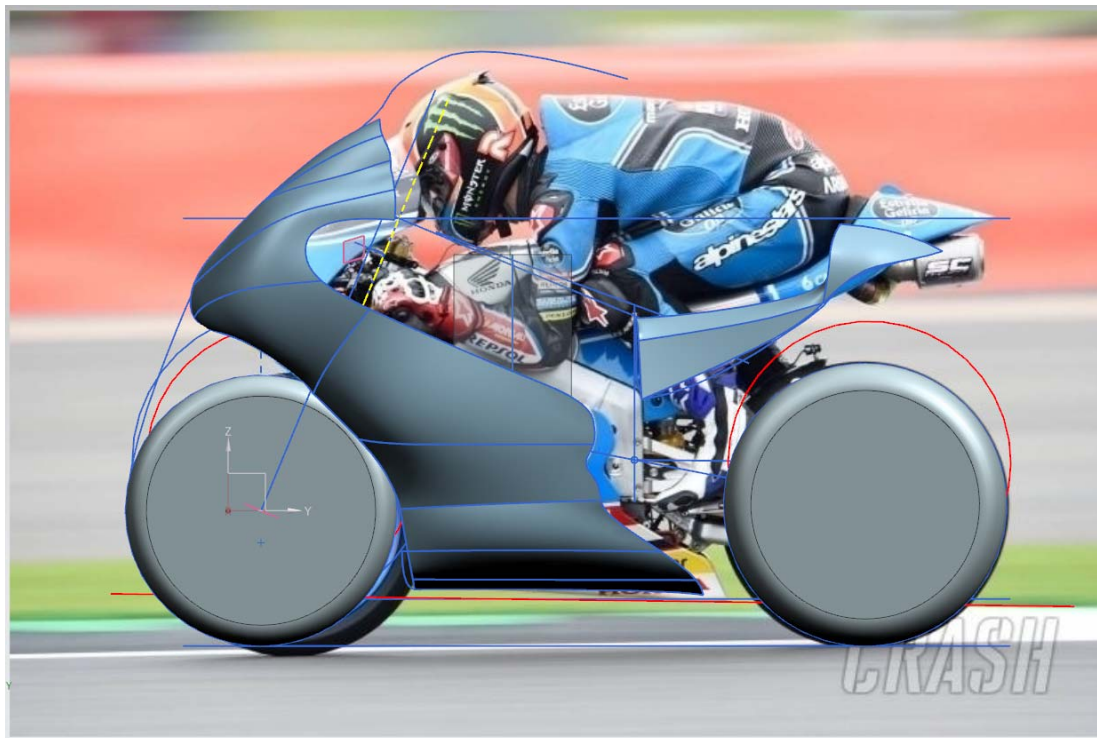


Figura 5.1.1: Diseño en CAD a partir de foto de Moto 3

Al tener este carenado se llevaron a cabo las primeras simulaciones. Para definir el parámetro de la velocidad se tomaron los resultados de la competición pasada y se calculó la velocidad media.

Luego se incorporó el archivo CAD en el programa:

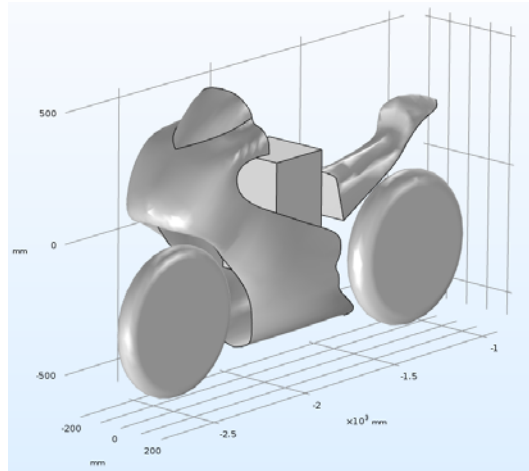


Figura 5.1.2: Importación del Carenado en Comsol

Y se realizó la primera simulación teniendo en cuenta modelos semejantes distribuidos por la empresa Comsol. Este estudio constaba de 258.324 grados de libertad y en converger requirió de 21 minutos

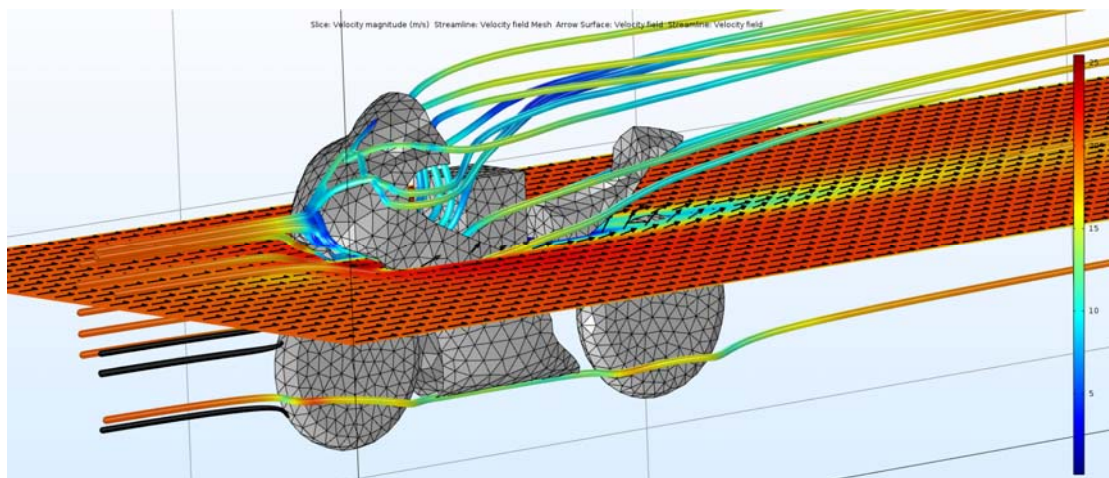


Figura 5.1.3: Simulación Aerodinámica 1

Luego, tras leer y revisar más fuentes se pudo ver que al realizar la simulación sobre la mitad del cuerpo y utilizar como condición de borde la simetría se podría ahorrar la mitad de los elementos de simulación.

Por otro lado, surgió una idea de mejora aerodinámica para aumentar el downforce sobre el frontal, de esa forma ayudando a evitar el levantamiento de la rueda delantera y permitiendo mayor aceleración, por lo que se realizaron las simulaciones.

5.1.2. Propuesta de Mejora Aerodinámica



Figura 5.1.4: Fotos varias de canalizaciones de MotoGP. Fuente: MotoGP

Inspirado en las innovaciones vistas en el Moto GP se planteó hacer un diseño del mismo concepto, sin modificar fuertemente el diseño exterior de la motocicleta e imitando la sección de un alerón típico. Como se buscaba algo pequeño que no aumentara el área frontal se llegó a un diseño:

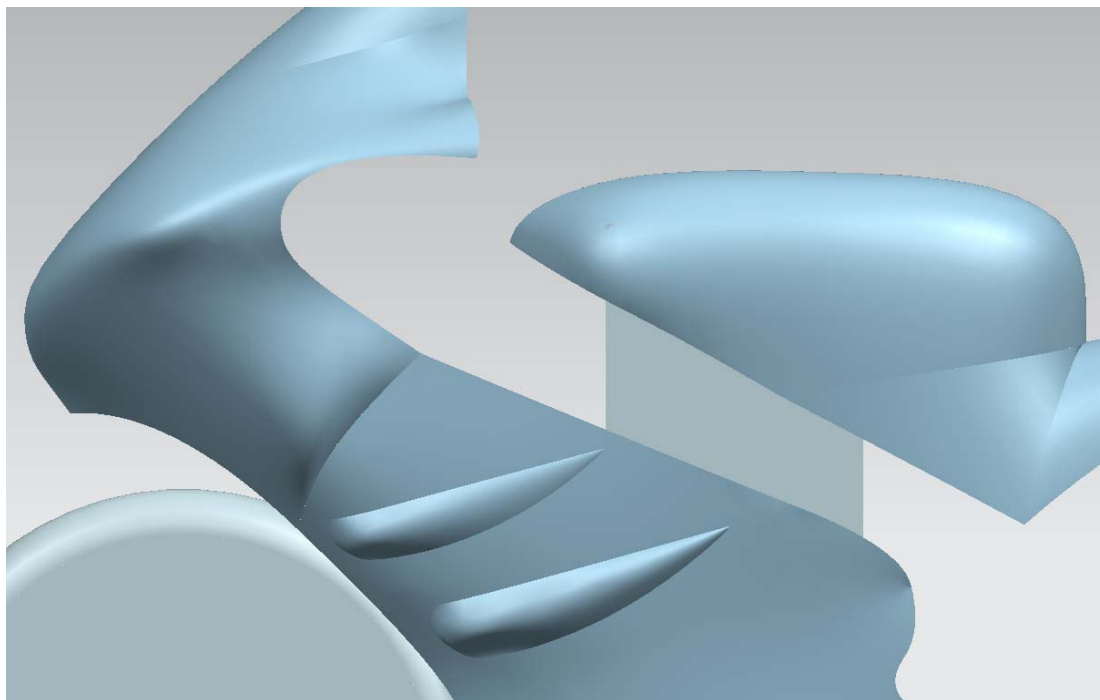


Figura 5.1.5: Diseño en CAD de mejoras aerodinámicas propuestas 1

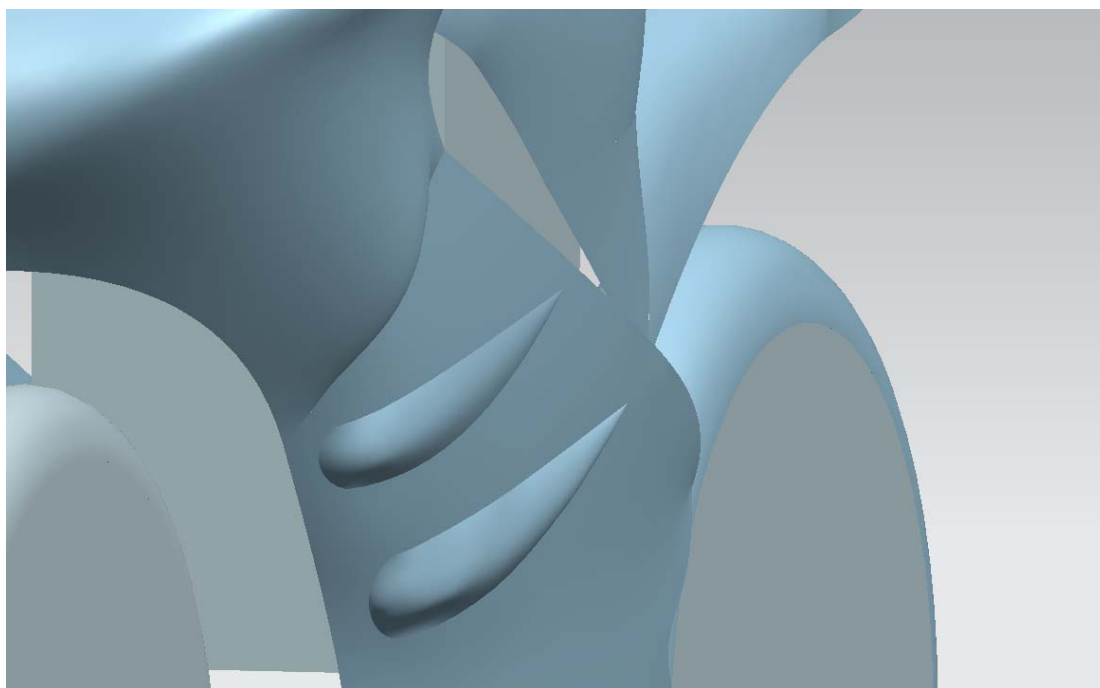


Figura 5.1.6: Diseño en CAD de mejoras aerodinámicas propuestas 2

Y al realizar las simulaciones se obtuvo que la fuerza aplicada sobre el eje vertical se encontraba alrededor de los 15 N, en otras palabras, casi despreciable. Dado este resultado, se echó a atrás esta propuesta y se continuó el enfoque en mejorar el drag por sobretodo.

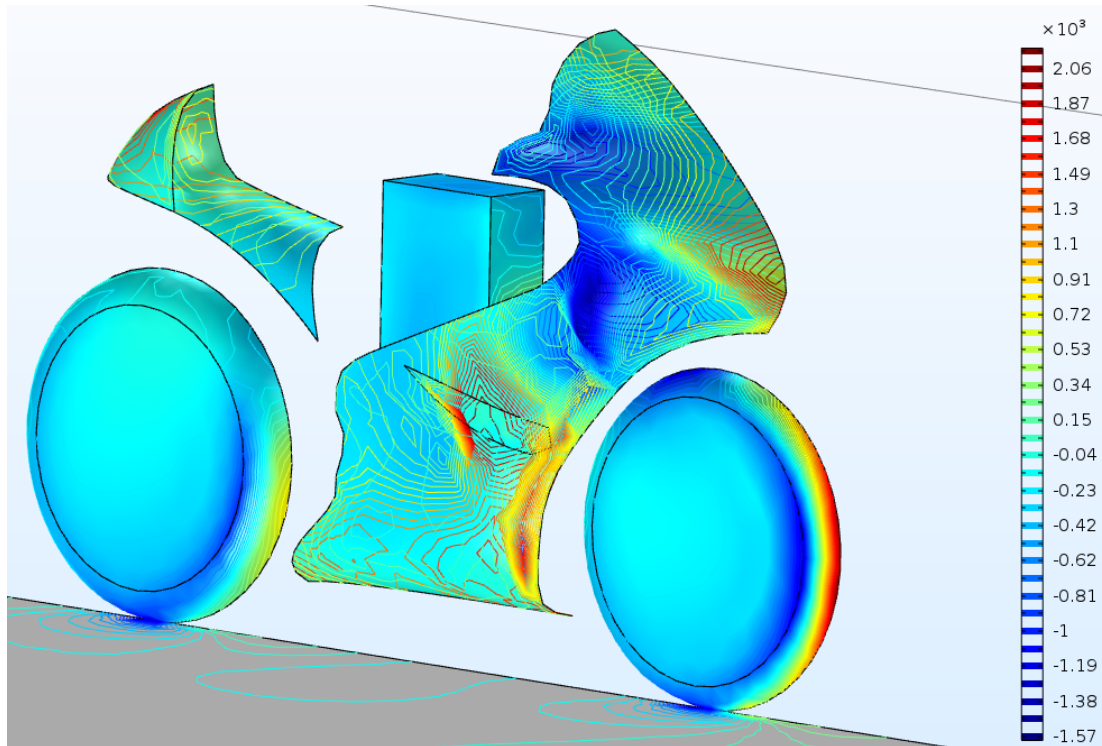


Figura 5.1.7: Simulación aerodinámica de mejora - Estudio de presiones

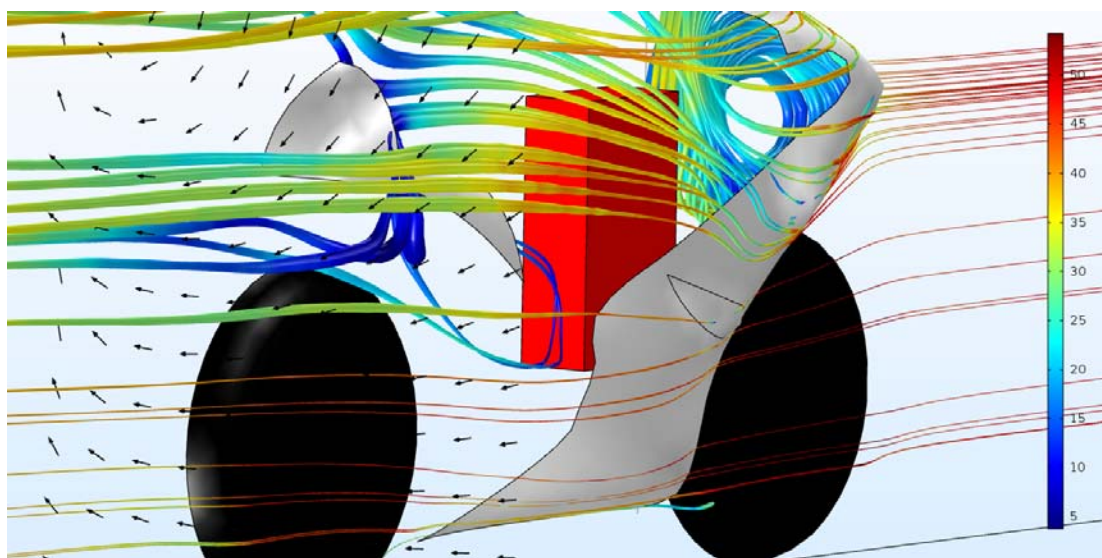


Figura 5.1.8: Simulación aerodinámica de mejora - Estudio de velocidades y líneas de corriente

5.1.3. Simulación de Referencia

Al ver los resultados, y la dificultad en la convergencia, se pudo advertir que no incorporar a la piloto había sido un error. En las motos el piloto es un elemento aerodinámico más, además de que detrás de la cúpula se generaban unos vórtices que hacían que el cálculo sea más complejo (como se puede ver en la Figura 5.1.8). Dado esto, se modeló un piloto simplificado y se agregó al modelo de la moto:

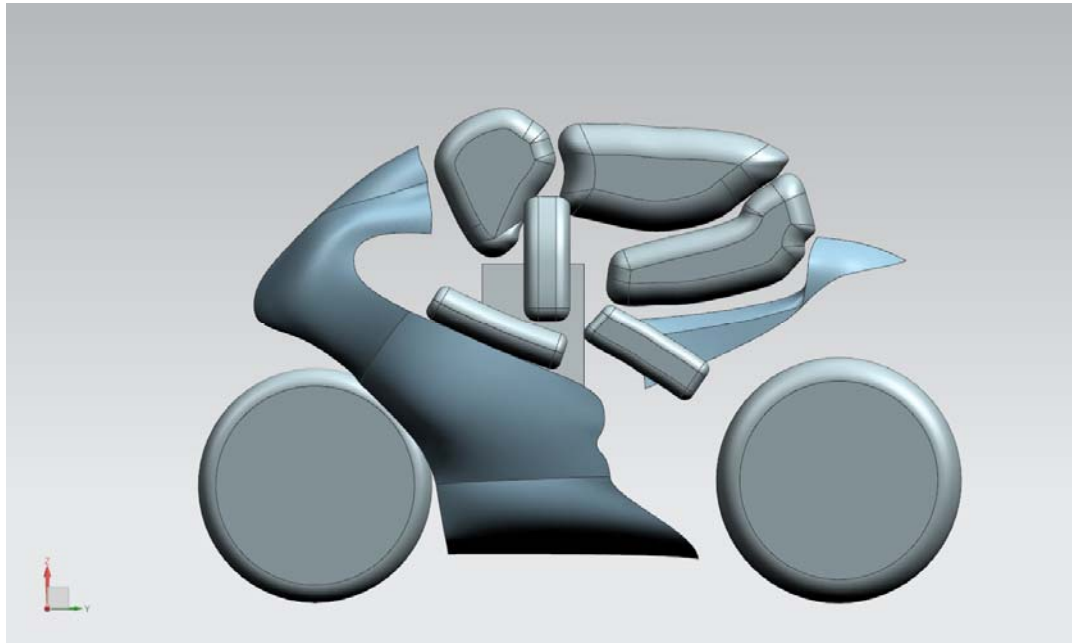


Figura 5.1.9: Modelado en CAD del Piloto Simplificado Acoplado a la Moto

Como se puede ver en Figura 5.1.9 también se incluyó un battery pack con una geometría simplificada.

Se definió un túnel con las siguientes dimensiones:

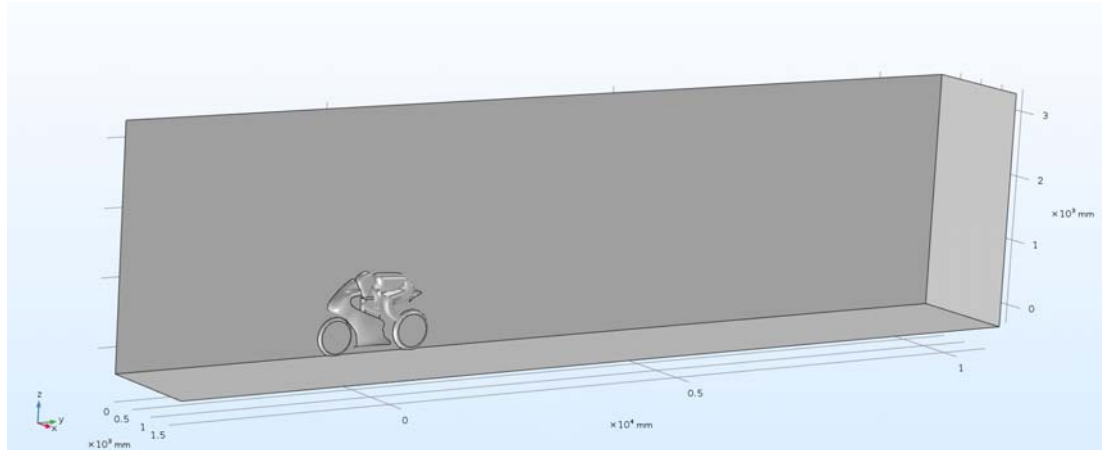


Figura 5.1.10: Túnel de viento virtual en Comsol

Usando de referencia el largo de la moto como L:

Width:
 Depth:
 Height:

Figura 5.1.11: Introducción de datos en Comsol

Para lograr una simulación con buena convergencia de una forma ágil se puso en práctica el método iterativo de refinamiento de mallas hasta que el tiempo de convergencia fue demasiado largo.

También, se seleccionó un modelo de turbulencia k- ϵ debido a que es el más utilizado en la industria de los vehículos y que funciona muy bien para este tipo de modelos. No hay que olvidarse que el estudio realizado se centra en los efectos que genera el flujo de aire sobre la moto, pero no en estudiar las capas límites y/o la turbulencia en detalle.

La última simulación se realizó con un mallado de casi 4 millones de elementos:

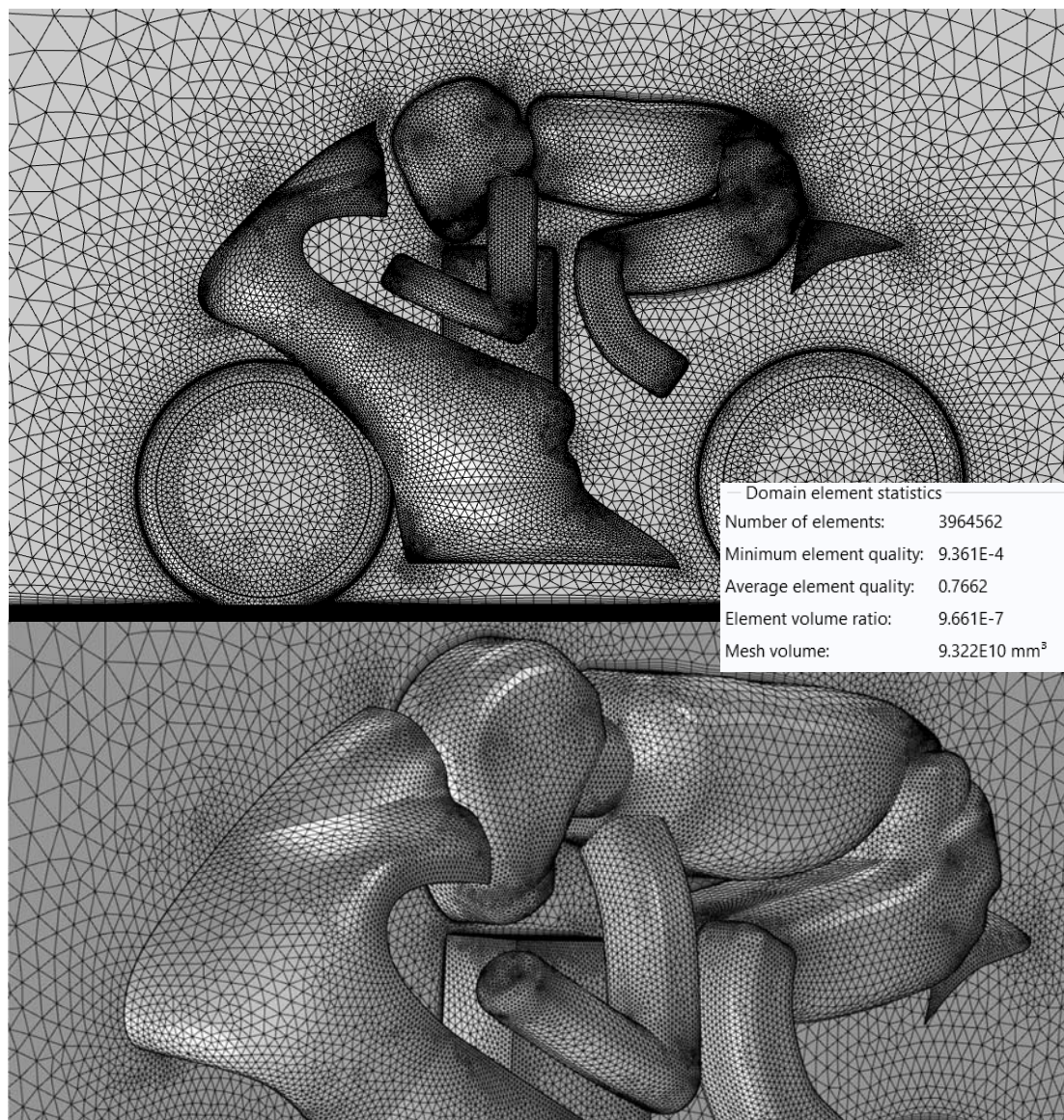


Figura 5.1.12: Mallado simulación de referencia

Tardó aproximadamente 16 hs. en concretarse, utilizando 20GB de memoria RAM, utilizando el Workstation.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

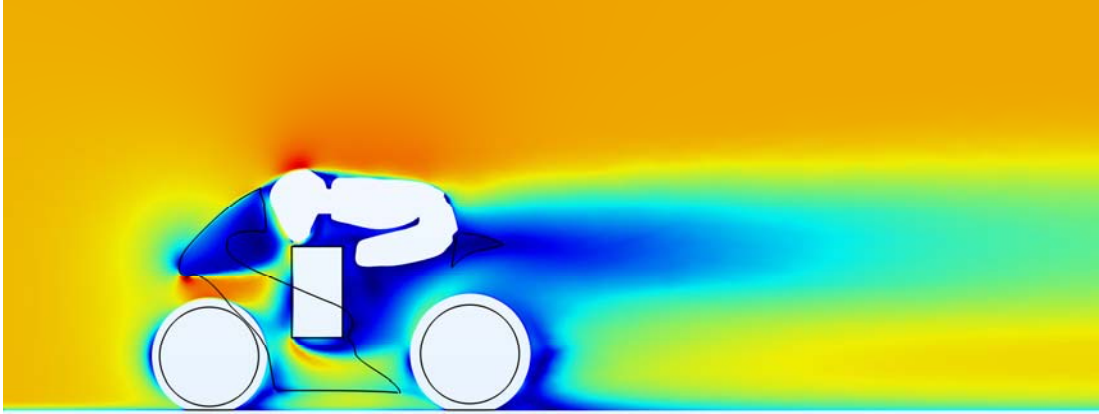


Figura 5.1.13: Simulación de referencia - Velocidades

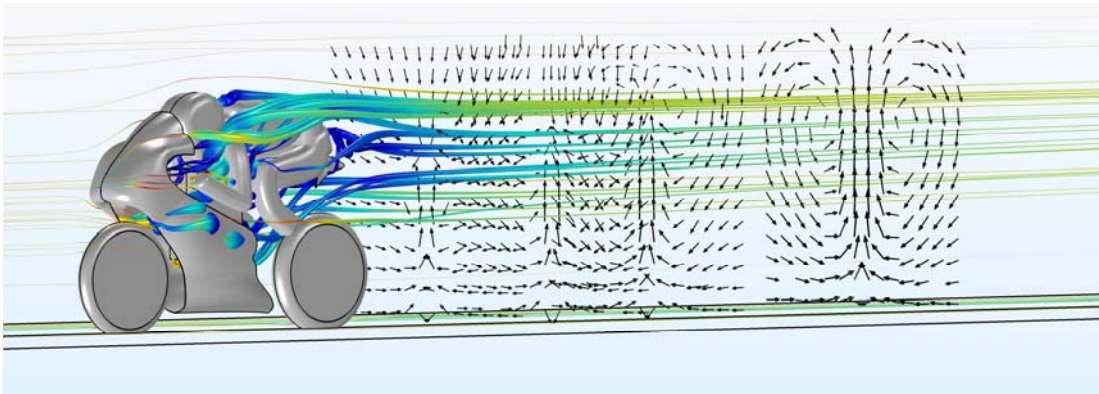


Figura 5.1.14: Simulación de referencia - Líneas de corriente (diámetro expresa energía cinética de turbulencia y color velocidades) y vectores velocidad en distintos planos

En estas simulaciones se ve que el piloto sufre una fuerte incidencia del aire. Además, se ve buena velocidad del flujo interno, lo que es positivo, aunque no está el motor. Por último, la moto deja mucha estela, se generan vórtices grandes detrás de la moto, lo que es un impacto negativo en la reducción del drag.

En este modelo se generan 79,875 N de fuerza de resistencia al avance, por lo que pasamos a calcular el drag:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} * \rho * U_\infty^2 * A_F} = \frac{79,875 * N}{\frac{1}{2} * 1.225 * \frac{kg}{m^3} * \left(33,33 * \frac{m}{s}\right)^2 * 0.4 * m^2}$$

$$\boxed{C_D \cong 0.49}$$

Según uno de los libros consultados los coeficientes de drag se sitúan entre 0,4 y 0,5 por lo que nos parece un valor bastante acertado.

5.1.4. Etapas Intermedias

Utilización de Cuerpos Sólidos

Se observó que la forma correcta de modelado del carenado era con sólidos en vez de superficies, porque de esa forma el programa utilizaba las funciones de pared o wall functions, permitiéndonos un valor más acertado de las fuerzas de arrastre en el modelo, además de que, claramente, era más real.

Con esa situación se pasó a la etapa de comenzar a probar carenados que cumplieran los requerimientos tanto dimensionales de las piezas, como de reglamento:

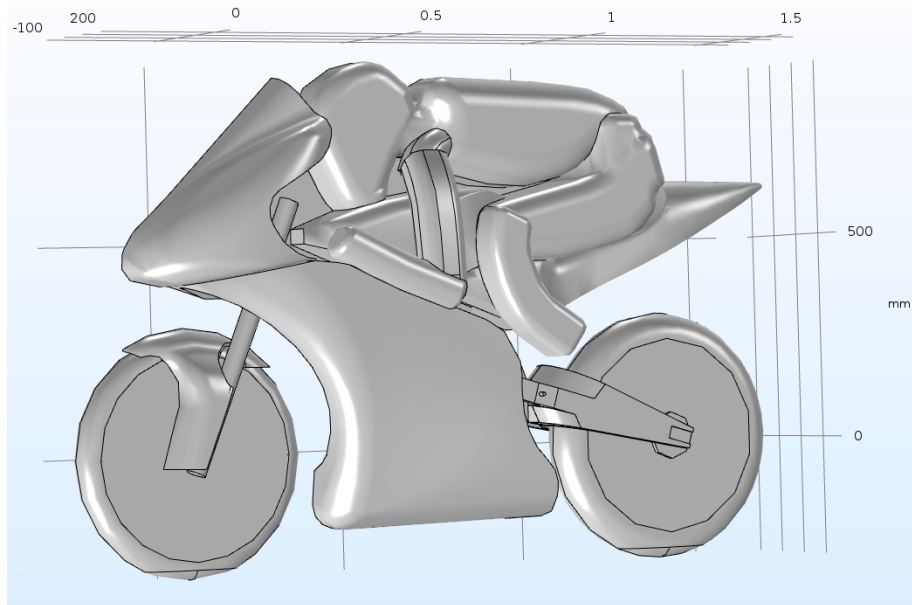


Figura 5.1.15: Primer modelo hecho con sólidos

También, simulación a simulación se pudo aprender de qué manera utilizar algunas herramientas que presenta Comsol para simplificar el modelo de estudio, ya que de esa forma era posible ahorrar elementos del mallado que, al fin de cuentas, se traduce en una reducción del tiempo de cálculo.

Estas simulaciones iniciales permitieron, además, obtener datos preliminares que se podrían utilizar para ver las presiones que sufrirían algunas piezas, o la carga que habría sobre los soportes de los carenados.

5.1.5. Simulación y Diseño Final

El mayor desafío a la hora de enfrentarse al diseño final del carenado fue llegar a una relación de compromiso tal que satisficiera todas las necesidades de la moto. Respetar los volúmenes de cada componente, asegurar que la disposición se resolviera en un buen centro de gravedad y que todo sea construible, ensamblable y cumpliera las normativas.

También es verdad que, a la hora del diseño final, todavía había muchas dudas en cuanto a las generaciones de calor. No se habían podido realizar pruebas suficientes con el motor y el inversor, las pruebas del battery pack eran en pequeña escala, por lo que no tenía claro el calor a disipar, dejando cierto margen para modificaciones posteriores.

En los próximos capítulos será explicado el paso a paso hasta llegar a esta última simulación.

Diseño en CAD

Para comenzar con el diseño del carenado se esperó a tener la mayoría de los volúmenes ya definidos y con la experiencia de las simulaciones anteriores ya había idea del tipo de diseño que se quería lograr.

Se comenzó con el CAD de los elementos de la moto:

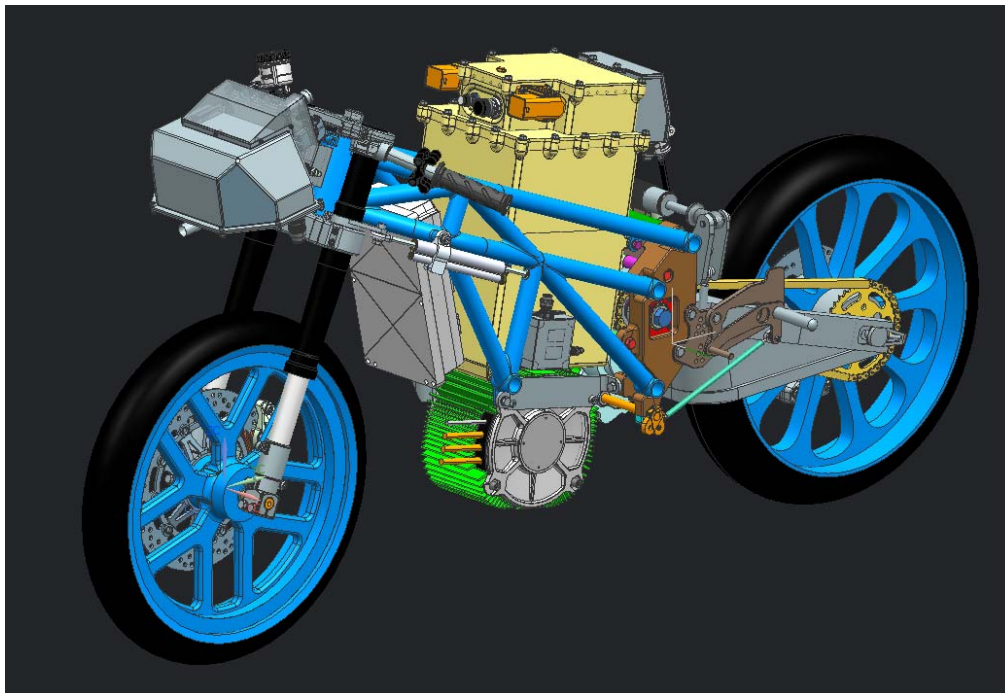


Figura 5.1.16: Elementos de la moto

Para el diseño se tomaron en cuenta las medidas antropométricas de la piloto, ya que es una moto hecha a medida, y se utilizó el dummy o maniquí que suministra el programa. El carenado no fue una excepción, ya que se perseguía el objetivo de cubrir parte de la piloto para lograr una reducción del drag. Por este motivo se acopló a Rocío (nombre de la piloto) a la moto, en la posición de aceleración y se empezó a diseñar los carenados. Si pareciera que el dummy tiene la cabeza desproporcionada, eso es porque se tienen en cuenta las dimensiones del casco.

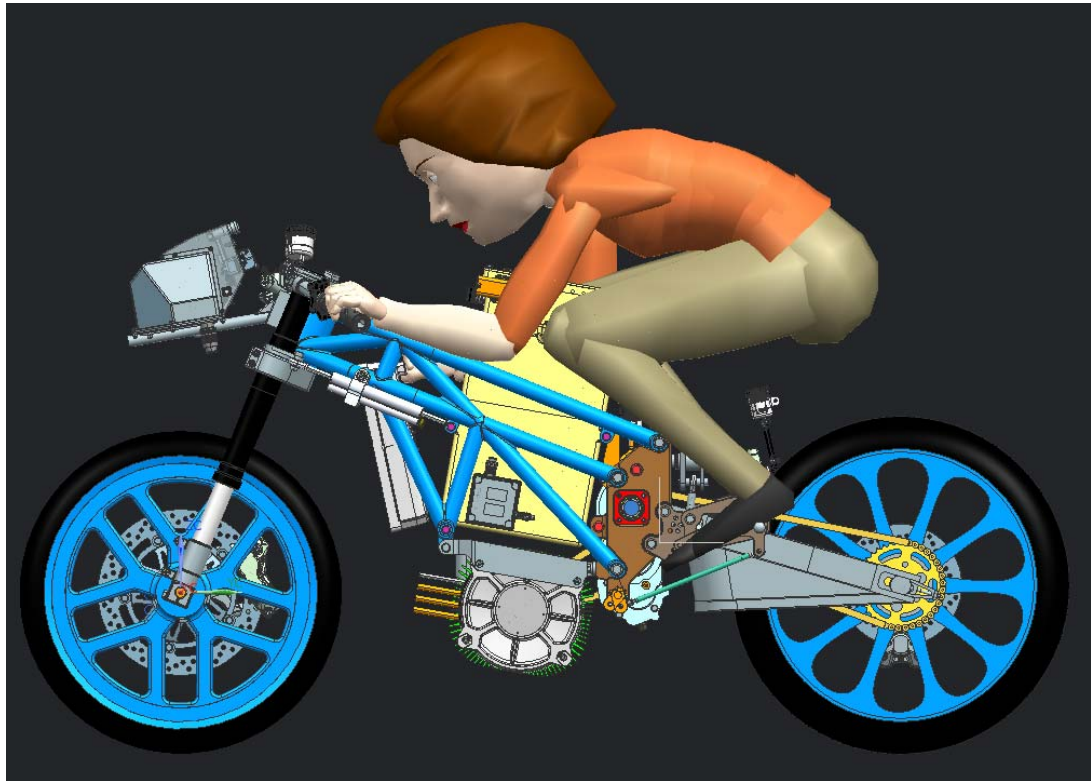


Figura 5.1.17: Elementos de la moto con piloto acoplada

Una vez que estuvieron estos elementos presentados se empezó a conjeturar el carenado:

- Frontal: Una de las misiones principales es evitar que el aire a alta velocidad incida directamente sobre la piloto, aunque tampoco se busca taparla al 100%. La solución adoptada es que el frontal cubra las regiones dónde la piloto no es aerodinámica (dónde las líneas de corriente no buscan seguirla). Esto, principalmente, se ve cuando el aire se encuentra con una geometría casi perpendicular a su dirección, en el caso de la moto, el frente del casco, los hombros, las rodillas y parte del brazo. De esta forma el aire seguirá mejor el contorno, sin tener un exceso de material en el carenado. La cúpula, por cuestiones de complejidad de fabricación, es de uso comercial, diseñada por Puig y comercializada para la Kawasaki ZX-10RR. Entonces, el frontal fue diseñado teniendo en cuenta esta cúpula.

- Laterales: Su objetivo está en cubrir los componentes de la moto, permitir un flujo de aire por el centro (para refrigeración) y también cubrir el frente de las piernas de la piloto, por aerodinámica. En esta moto el motor está posicionado en el sector inferior de la moto, para mejorar su centro de gravedad, por lo que fue el elemento que dictó el ancho del frontal y condicionó levemente la quilla. El agujero que se deja para ventilación también es importante para los movimientos de la dirección delantera, por lo que algunas de sus dimensiones derivan de aquí. Para diseñarlo se situaron la rueda y la horquilla delantera en las posiciones extremo: máxima compresión, posición sin carga y los giros máximos a ambos lados.
- Depósito: En lo que respecta a la aerodinámica el depósito solo es responsable de que el piloto logre la posición de mínima resistencia al aire. En cambio, la ergonomía aquí tiene un papel importante. Se busca que la posición de las piernas sea correcta para asegurar que se agarre bien y también que pueda inclinar la moto. En la cara superior se puede ver un hueco pensado para que ubique el mentón del casco, también para lograr que se agazape más.
- Colín: el colín en este carenado cumple una tarea importante, soportar a la piloto, dado que es autoportante. Para diseñarlo, primero se comenzó con los conceptos aerodinámicos para luego pasar a la simulación estructural. Analizando los aspectos aerodinámicos lo que se busca es que el colín siga la dirección de las líneas de corriente y disminuya la generación de puntos de baja presión por detrás, de esa forma reduciendo el drag. Además, tiene un diseño ergonómico a partir de las medidas de la piloto.
- Guardabarros: estos elementos son meramente aerodinámicos, empezando por el punto de que si hay lluvia no se realizará la carrera. El objetivo buscado es evitar que el flujo de aire que mueven las ruedas genere perturbaciones en la aerodinámica. Por ese motivo, intentan cubrir las zonas donde, o la rueda se encontraría con un flujo contrario a su movimiento, o el flujo generado genera consecuencias aerodinámicas.

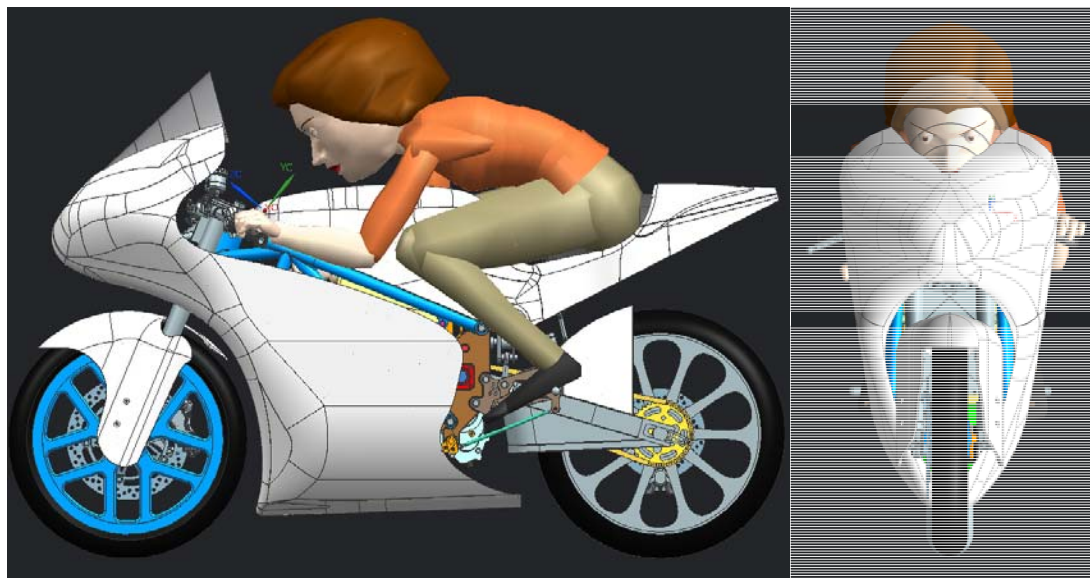


Figura 5.1.18: Detalles del diseño del carenado con la piloto

El carenado final resultó en el siguiente modelo:

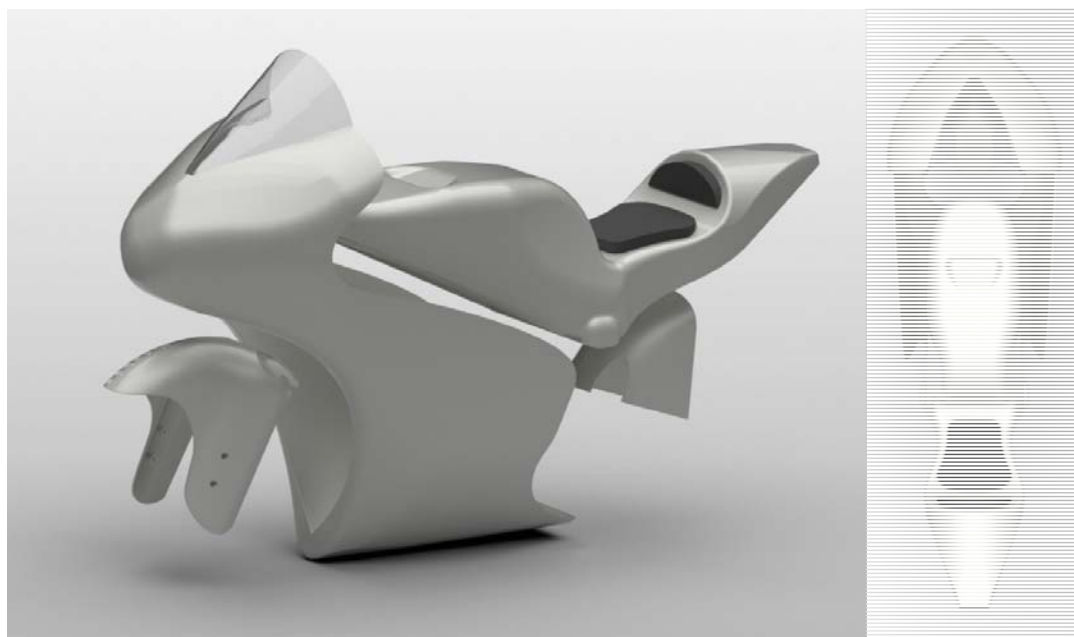


Figura 5.1.19: Render de piezas del carenado

Y aquí se puede ver el carenado acoplado al resto de los componentes:



Figura 5.1.20: Render de la moto completa

Simulación CFD

Teniendo el carenado ya diseñado el paso siguiente fue simplificar el modelo desde Siemens NX:

Para comenzar se eliminó la mitad de la moto, ya que la simulación es mejor hacerla por simetría, ahorrando elementos de mallado. Luego, el battery pack, el motor, el inversor y la transmisión se reemplazaron por sólidos con geometrías similares.

Por lo tanto, comenzando con el siguiente archivo de CAD (con el carenado y la piloto escondidos):

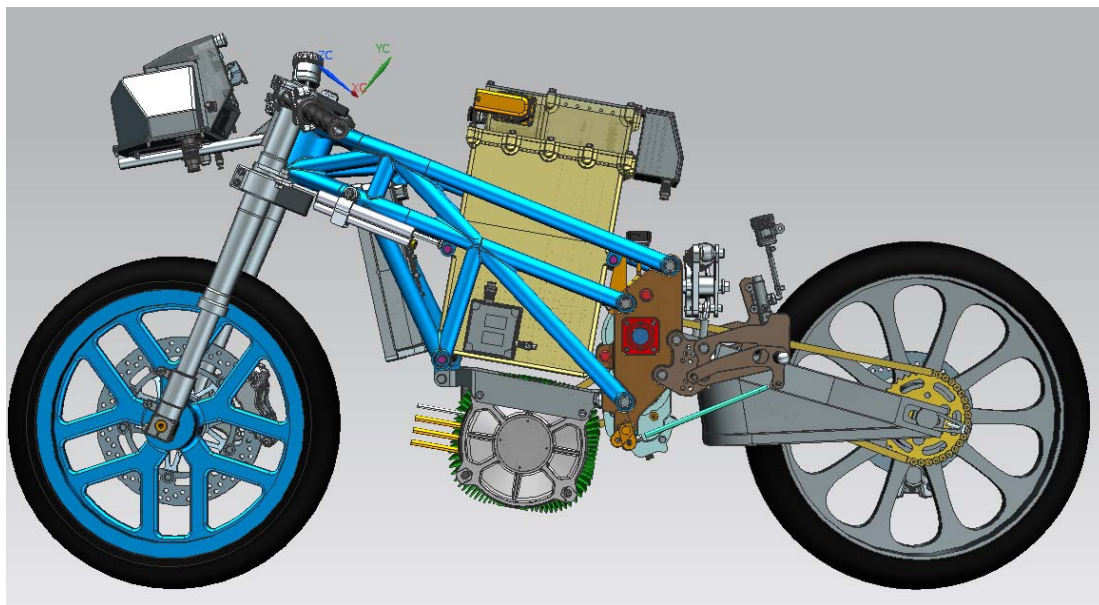


Figura 5.1.21: Componentes originales del diseño de la EPR01

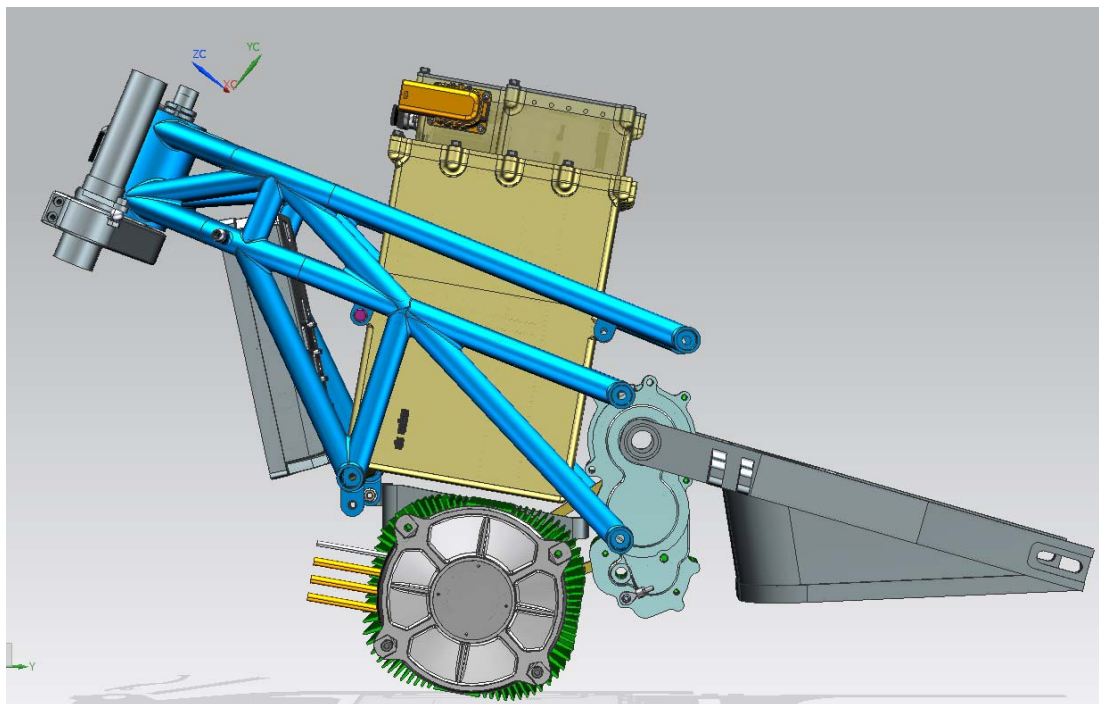


Figura 5.1.22: Detalle componentes a simplificar EPR01

Se llegó el siguiente CAD simplificado:

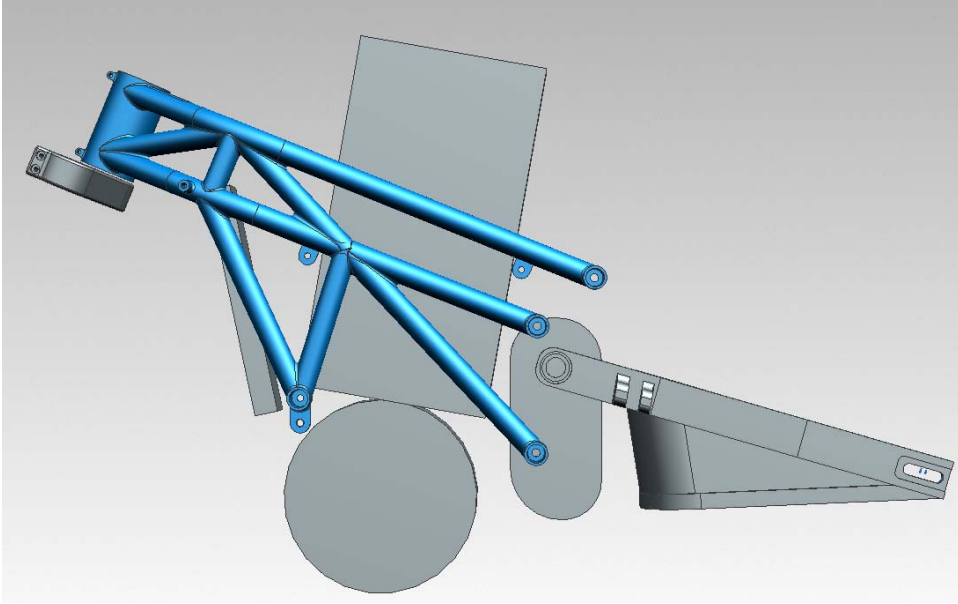


Figura 5.1.23: Componentes simplificados para simulación

Se tomó la decisión de dejar el chasis, la tija inferior y el basculante, ya que son elementos bastante grandes y pareció que realizar su mallado no sería complicado. Luego se acopló el piloto y dejé las ruedas y la suspensión delantera lo más sencillas posible.

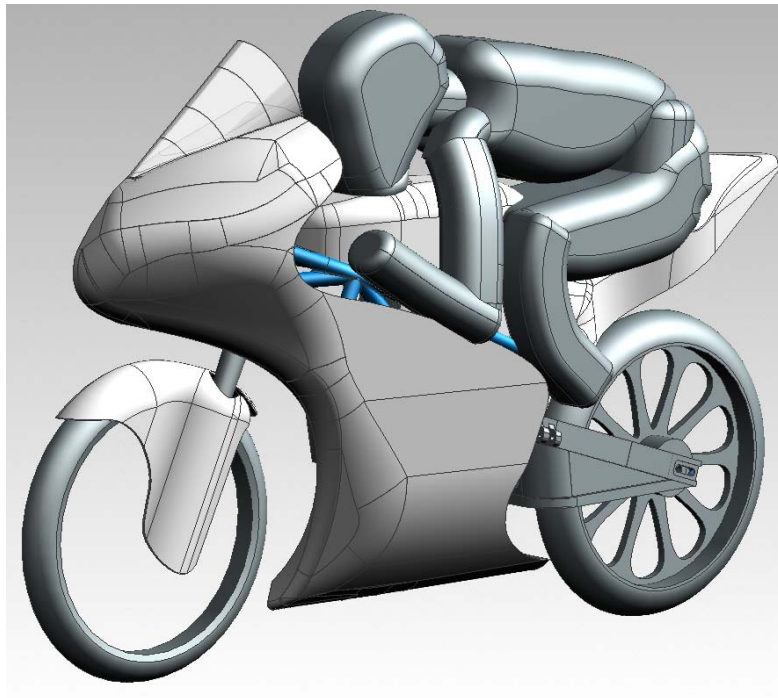


Figura 5.1.24: Modelo CAD simplificado para simulación

Teniendo esos archivos se procedió a importar al programa de simulación utilizado, el Comsol Multiphysics. Una ventaja de este software es que permite importar archivos de CAD desde muchos programas distintos de modelado, dentro de los cuales está el NX, lo que no presentó una dificultad.

Al importarlo quedó:

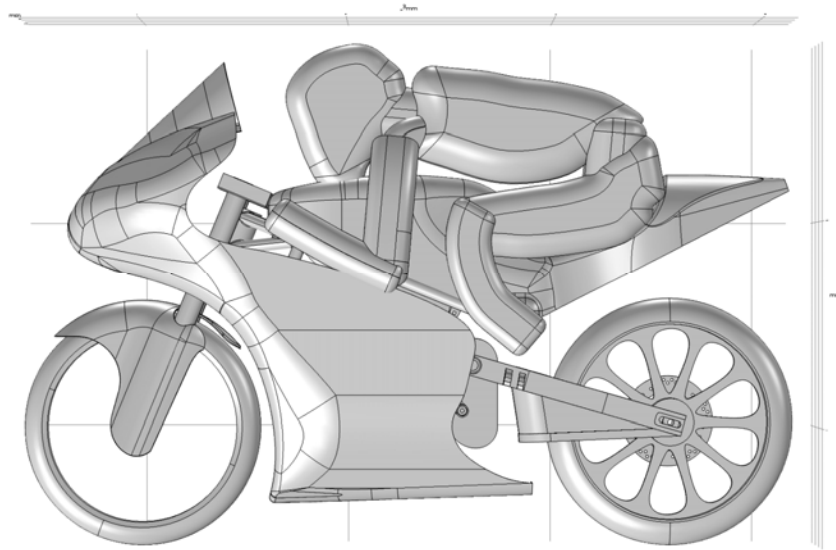


Figura 5.1.25: Modelo CAD importado a Comsol

Por lo que se puede ver, la importación fue exitosa sin mucho más esfuerzo. De todas formas, quedaba realizar modificaciones al modelo para realizar la simulación. Las siguientes simplificaciones fueron hechas desde la interfaz de Comsol, que cuenta con herramientas, de gran utilidad, pensadas para simplificar el modelo.

Para comenzar, se taparon las ruedas con la herramienta “Cap Faces”:

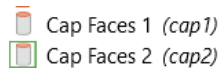


Figura 5.1.26: Herramientas Comsol

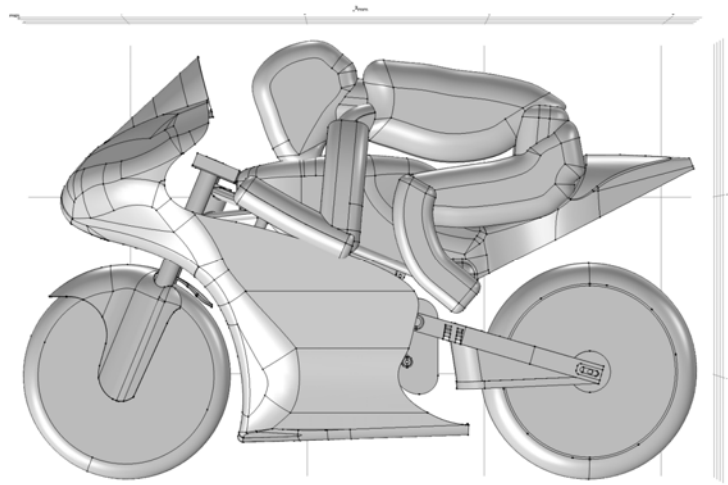


Figura 5.1.27: Detalle ruedas tapadas

Luego se agregó el bloque que sería el túnel de viento virtual con las siguientes dimensiones (siendo L la longitud de la moto):

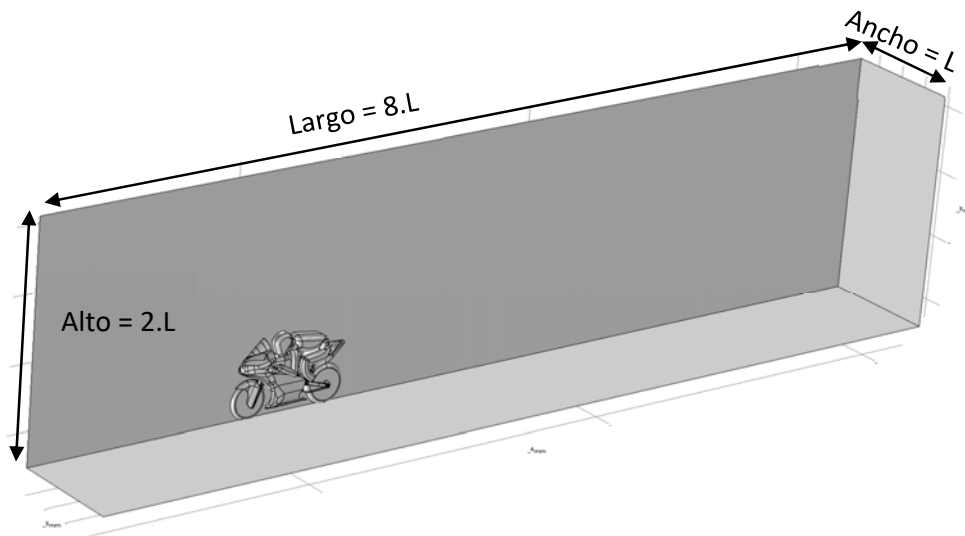


Figura 5.1.28: Túnel de viento virtual - Detalle dimensiones

Para mejorar el estudio, utilizando la herramienta “Unite” se unieron los sólidos que se superponían, ya que sino el mallador intenta incluir elementos para las caras que acaban siendo interiores.

Utilizando el modelo como está, el mallador automático generará en muchos lugares pequeños elementos que hacen que la convergencia sea difícil. Incluso en lugares donde no es necesario. Esto

ocurre porque al ser caras distintas del sólido, el mallador asume que los bordes de esas caras son puntos de interés y, por lo tanto, puntos de análisis. Claro, dependiendo del estudio esto puede ser verdad, por lo tanto, hay que analizarlo con cuidado. Más allá de eso, para los estudios iniciales se persigue más, la búsqueda de la convergencia, que el estudio en detalle de cada punto, eso lo podremos dejar para más adelante.

Dadas esas circunstancias, hay unas herramientas de Comsol, llamadas “Virtual Operations” u operaciones virtuales en español, para permitir que el programa ignore algunas cualidades del modelo. Esta funcionalidad es utilizada únicamente para los mallados y las definiciones en las físicas.

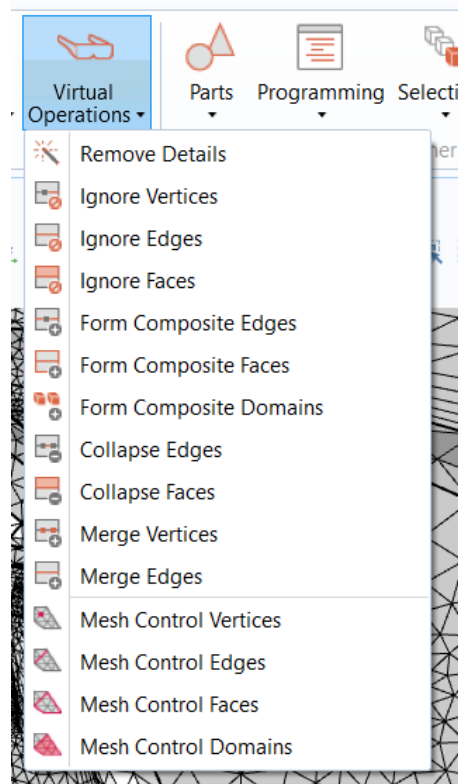


Figura 5.1.29: Menú de "Virtual Operations" de Comsol

En el modelo se utilizó primordialmente el “Form Composite Faces” y en las figuras siguientes se puede observar la diferencia:

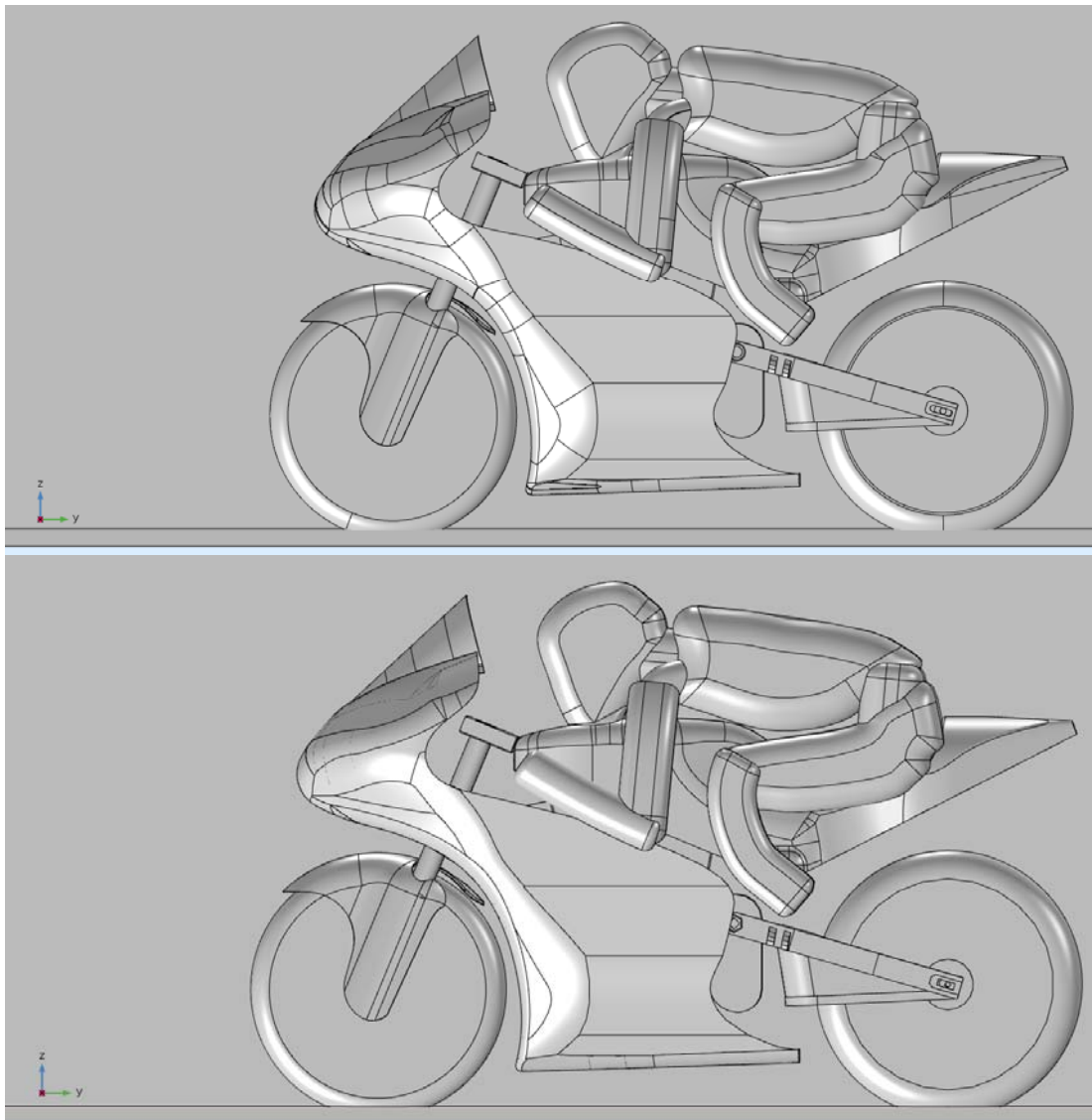


Figura 5.1.30: Diferencia entre caras originales (arriba) y modificadas (abajo)

Y en las siguientes figuras se puede ver las diferencias en los mallados. Hay que tener en cuenta que en las imágenes del mallado sin modificar no se ha aplicado la capa límite (se hizo solo a modo demostrativo) y que es con el mallado más grueso, para la primera simulación.

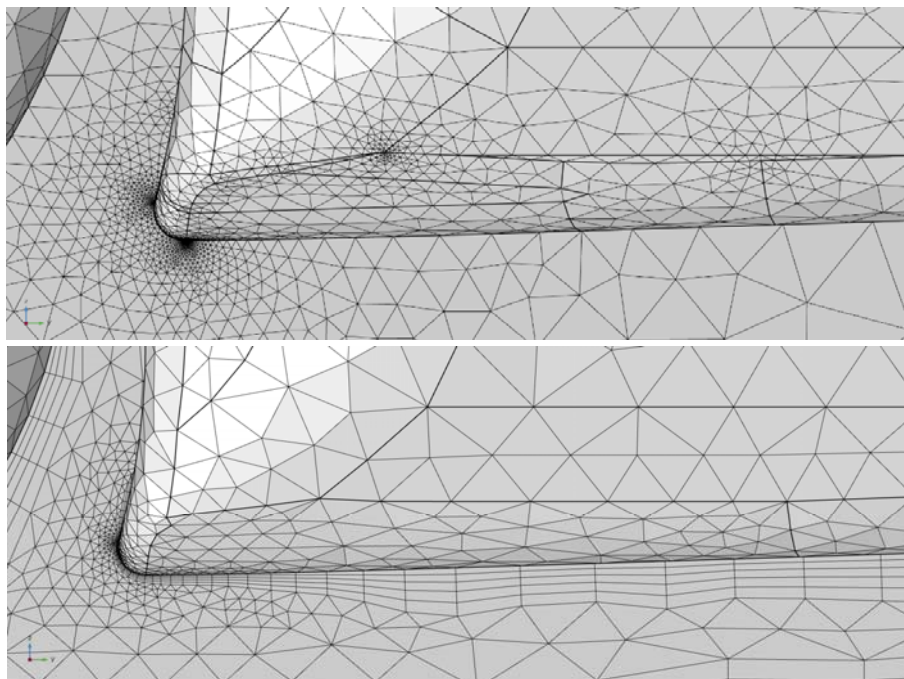


Figura 5.1.31: Detalle del mallado de la quilla original (arriba) y modificada (abajo)

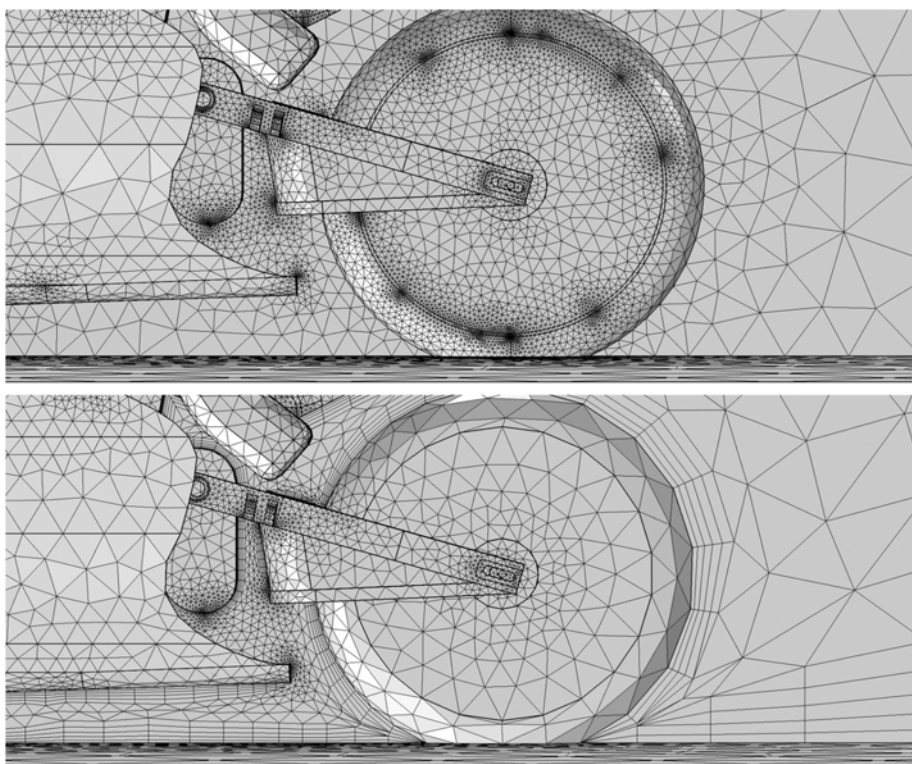


Figura 5.1.32: Detalle del mallado de la rueda original (arriba) y modificada (abajo)

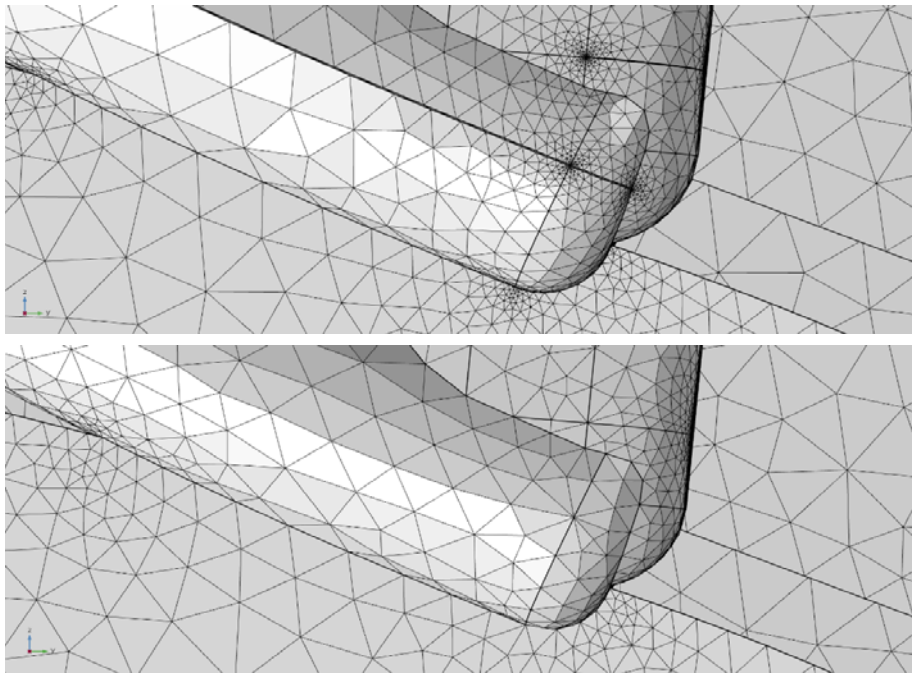


Figura 5.1.33. Detalle del mallado del codo de la piloto original (arriba) y modificada (abajo)

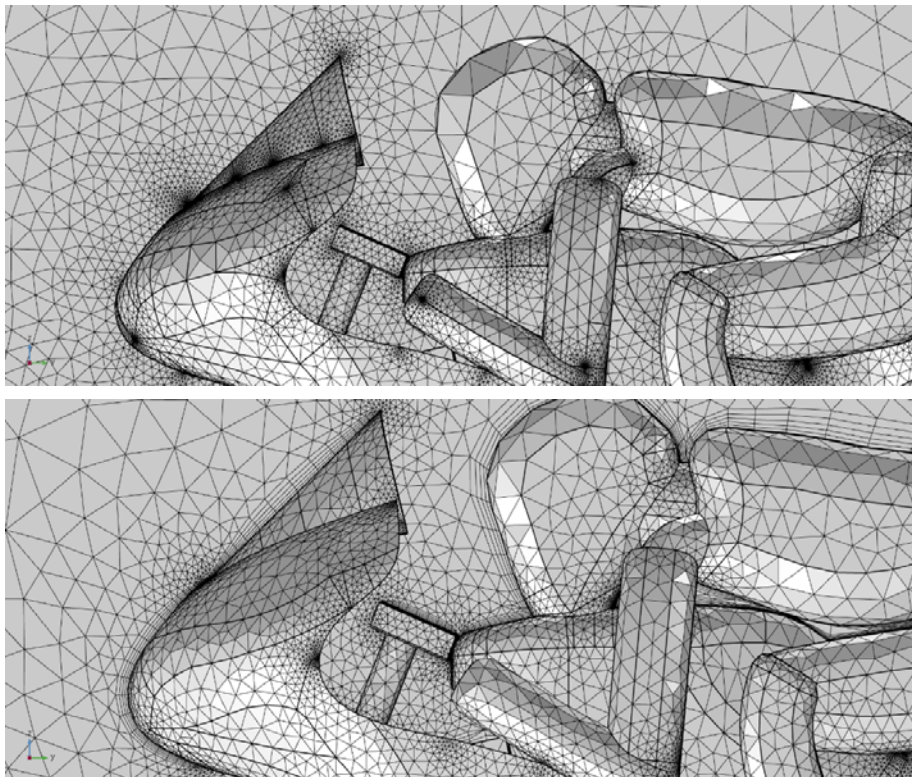


Figura 5.1.34: Detalle del mallado de la moto original (arriba) y modificada (abajo)

Una vez terminadas las operaciones de simplificación se definieron las físicas que intervenían en el modelo. En este caso fueron:

- Flujo laminar: Fue utilizado para realizar la primera simulación, es una física que converge más rápido y que da valores iniciales del campo de velocidades que después se puede tomar para el flujo turbulento.
- Flujo turbulento k- ϵ : Es la física que describe bastante bien los fenómenos esperados. La elección del modelo k- ϵ se basa en que tiene buena convergencia y se usa mucho en este campo de estudio. Por lo tanto, se esperan que los resultados sean buenos.

Dentro de ambas físicas se tuvieron que definir ciertos parámetros:

- Inlet: la superficie por la que ingresa el fluido. Se define la velocidad y las propiedades del fluido. Se impone además que el flujo sea normal a la superficie.
- Wall 1: Son las paredes en las que hay fricción. En mi caso serán todas las superficies de la moto como también el suelo.
- Wall 2: Son las paredes en las que no hay fricción. Es interesante poder utilizar esto porque se logra ahorrar elementos de capa límite, que hacen que la convergencia sea más compleja.
- Outlet: Es la superficie por la que puede salir el fluido. Se impone como condición de borde que la presión sea 0 (relativa).
- Symmetry: Esta superficie define como condición la simetría. Es muy importante ya que permite ahorrar la mitad de los elementos, en este caso que la moto es simétrica y el flujo que se estudia tampoco cambia en las dos mitades.

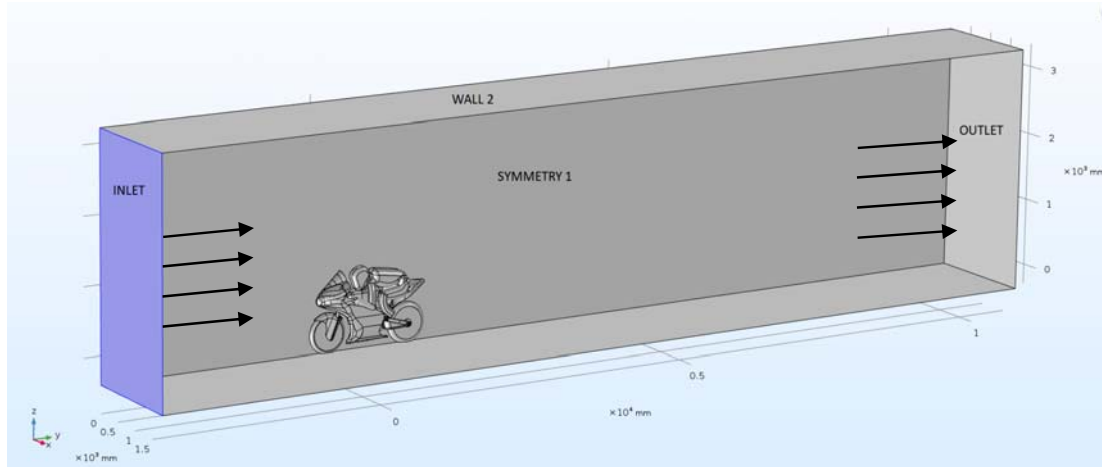


Figura 5.1.35: Definiciones en Comsol

Luego de definido todo lo anterior, se realizó el primer mallado:

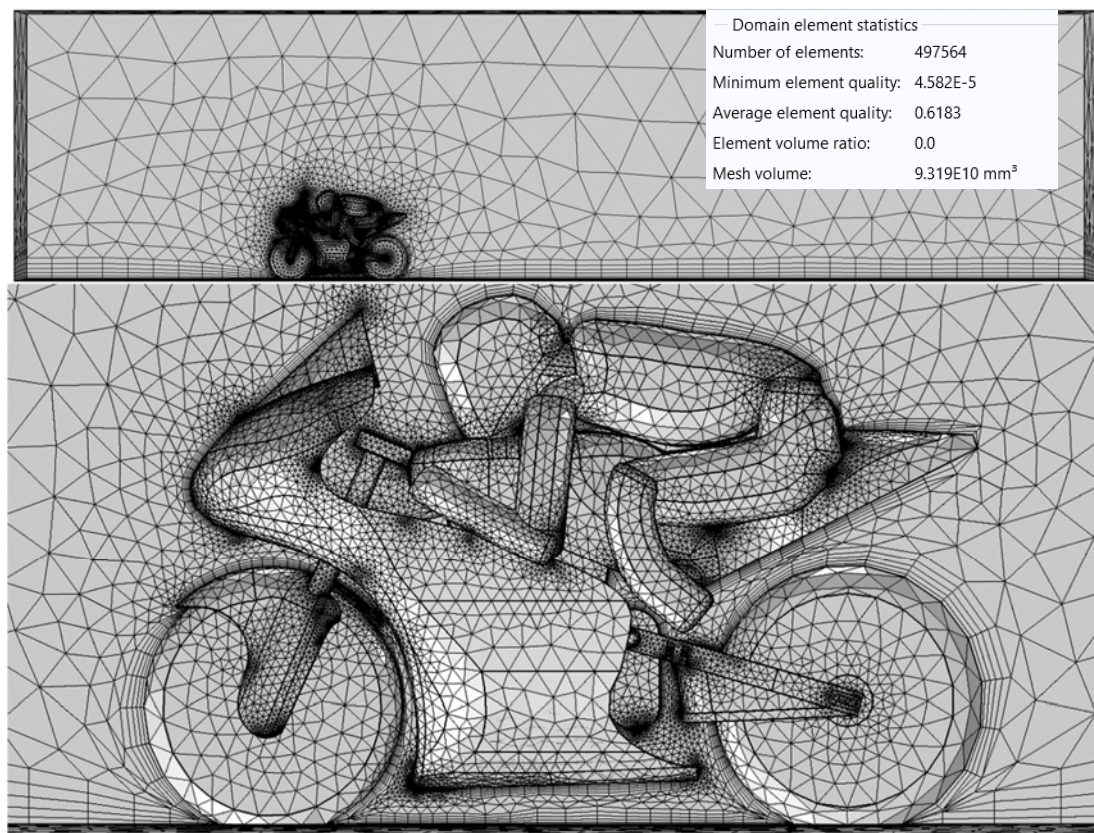


Figura 5.1.36: Primer mallado de la simulación final

Este mallado fue realizado por el mallador automático del programa, el cual, según la física y las condiciones impuestas hace el mallado. Tiene varios niveles de calidad, en orden: Extremely Coarse,

Extra Coarse, Coarser, Coarse, Normal, Fine, Finer, Extra Fine, Extremely Fine. Para la primera etapa se utilizó el peor de todos, para facilitar la convergencia y para obtener un resultado rápido y verificar que está todo bien definido.

La primera simulación estudiando el flujo laminar en estado transitorio tardó 15 minutos en converger, y se pudo verificar que el modelo estaba bien definido. A partir de eso utilicé estos datos de partida para llevar a cabo el primer estudio turbulento que tomó 1 hora y 23 minutos de cálculo y usando 6 GB de RAM, sin modificar la malla.

Al tener estas simulaciones se comenzó a refinar la malla para obtener un resultado más preciso. Se buscó hacer el mejor mallado posible, dentro de los límites de tiempo que se supusieron como máximos, utilizando un ordenador ordinario.

El mallado final acabó siendo de más de 5 millones de elementos, lo que el programa considera "Normal":

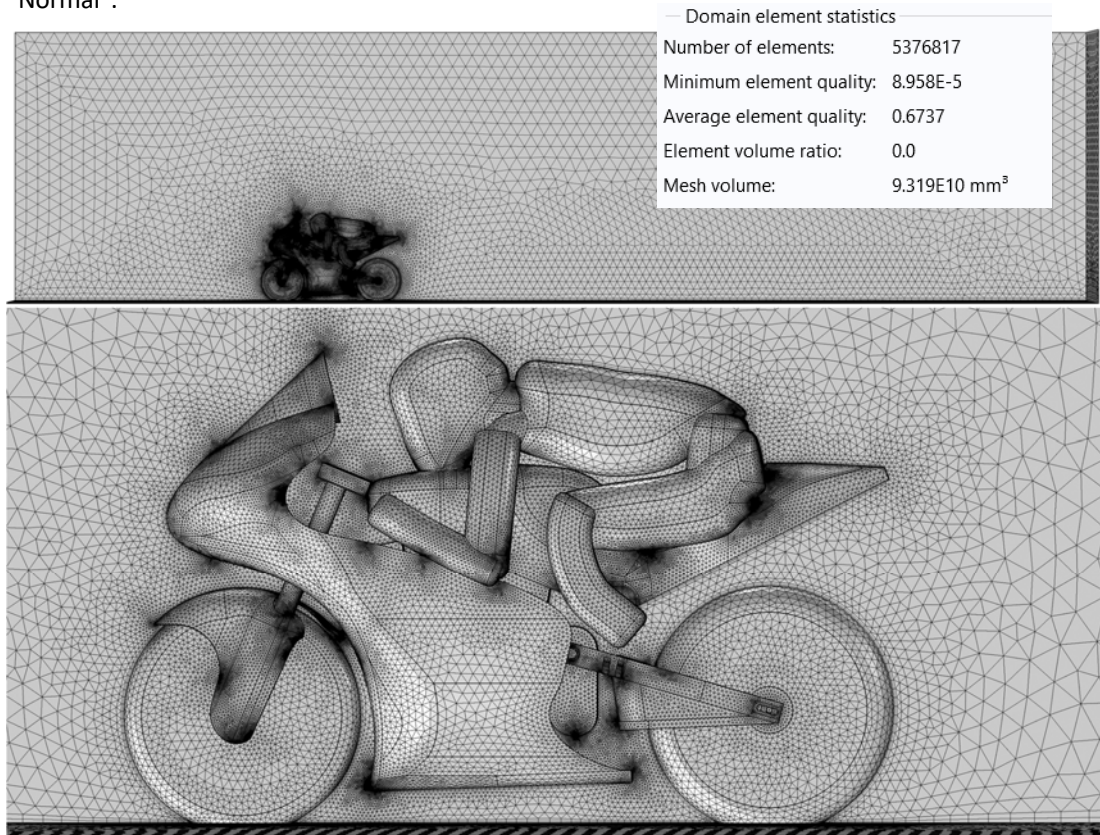


Figura 5.1.37: Mallado final

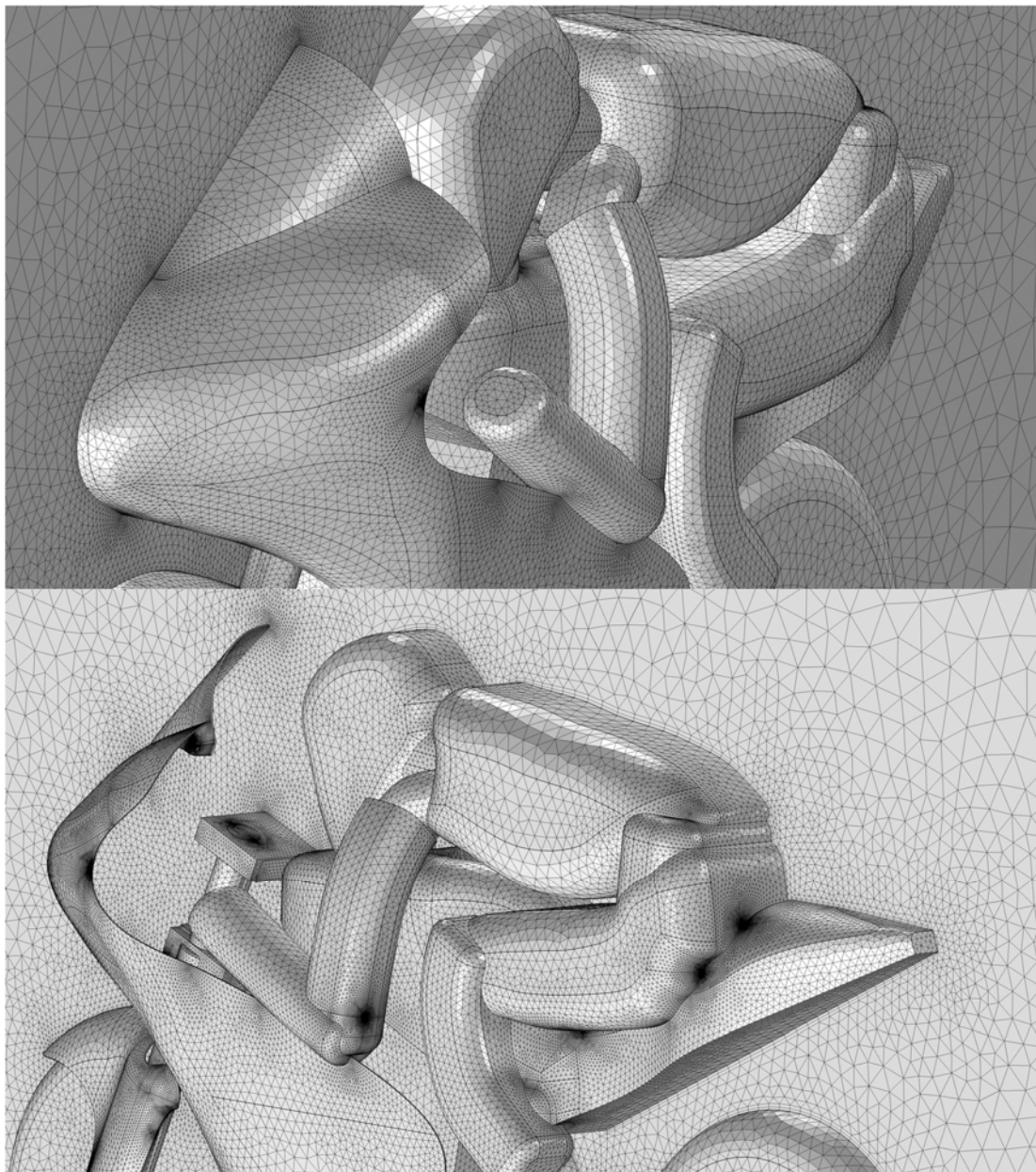


Figura 5.1.38: Mallado final - Detalle 1

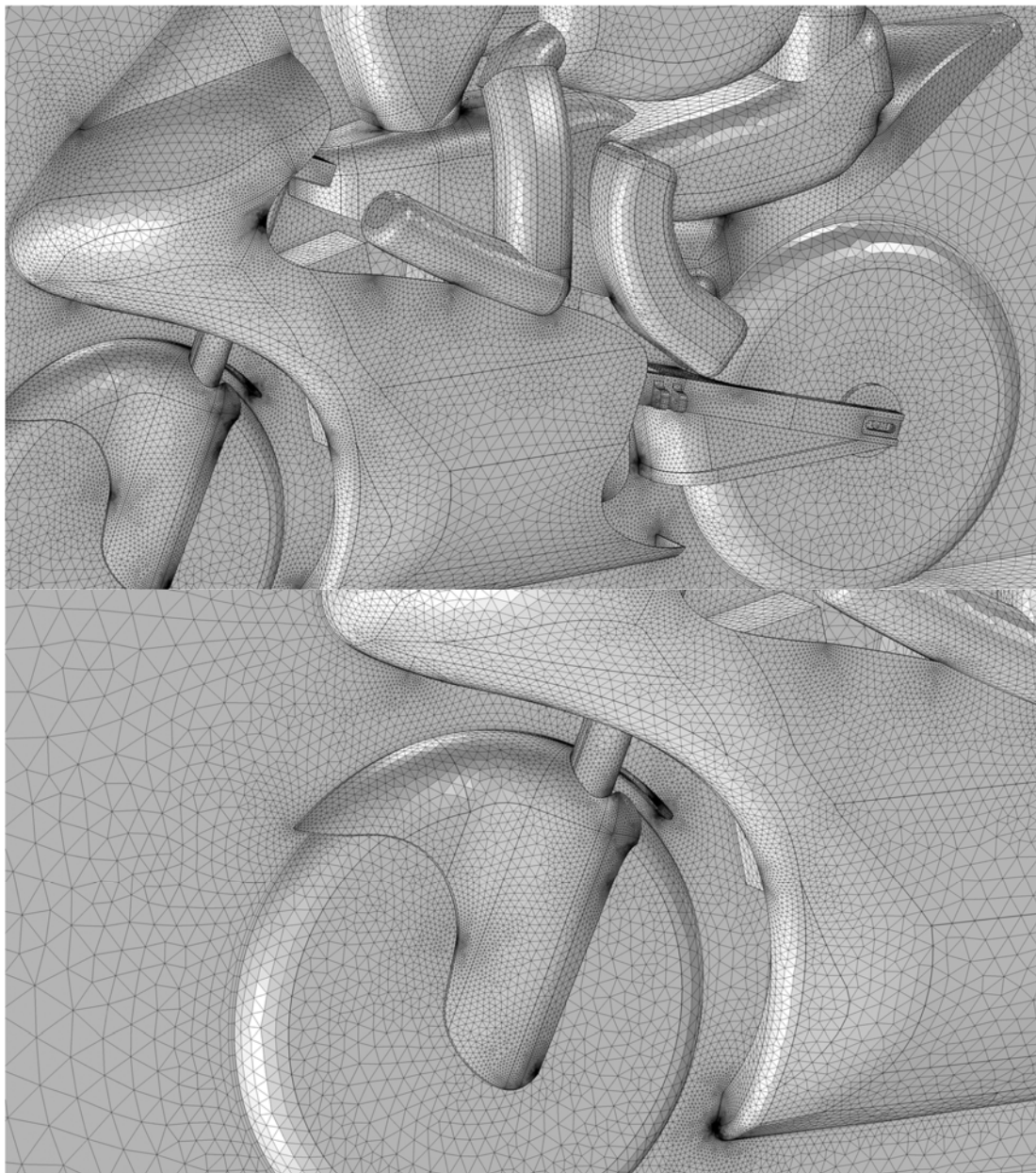


Figura 5.1.39: Mallado final - Detalle 2

Esta simulación tardó 2 días y 3 horas en converger, utilizando el Workstation.

Se tuvieron como resultado las siguientes representaciones:

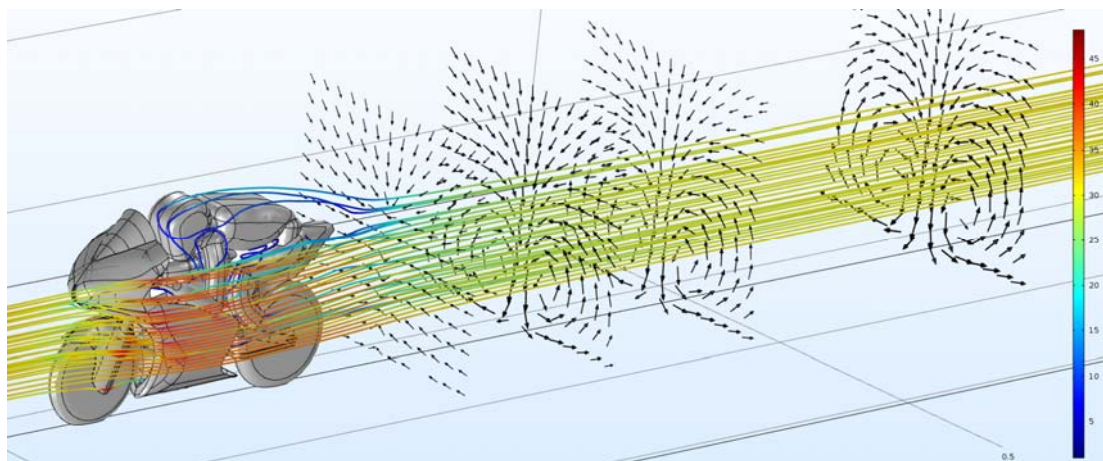


Figura 5.1.40: Simulación final - Vectores velocidad en el plano de corte y líneas de corriente. Color indica velocidad en m/s

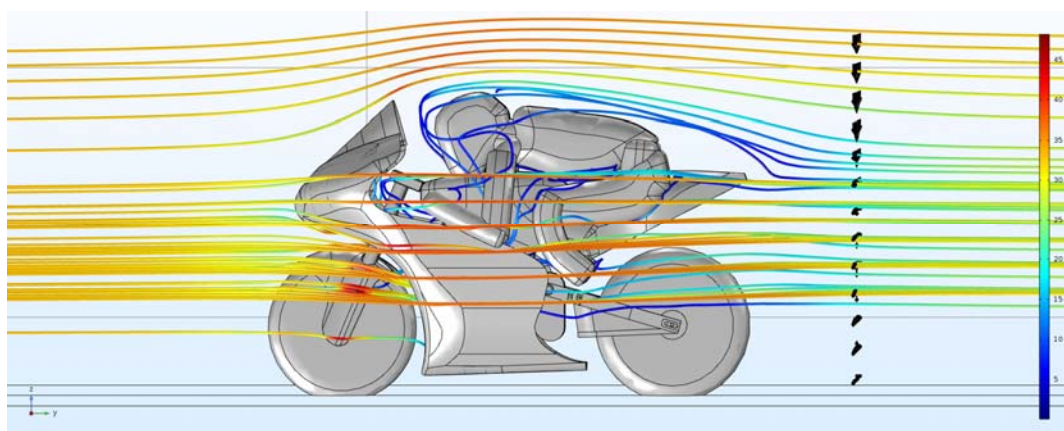


Figura 5.1.41: Simulación final - Líneas de corriente. Color indica velocidad en m/s

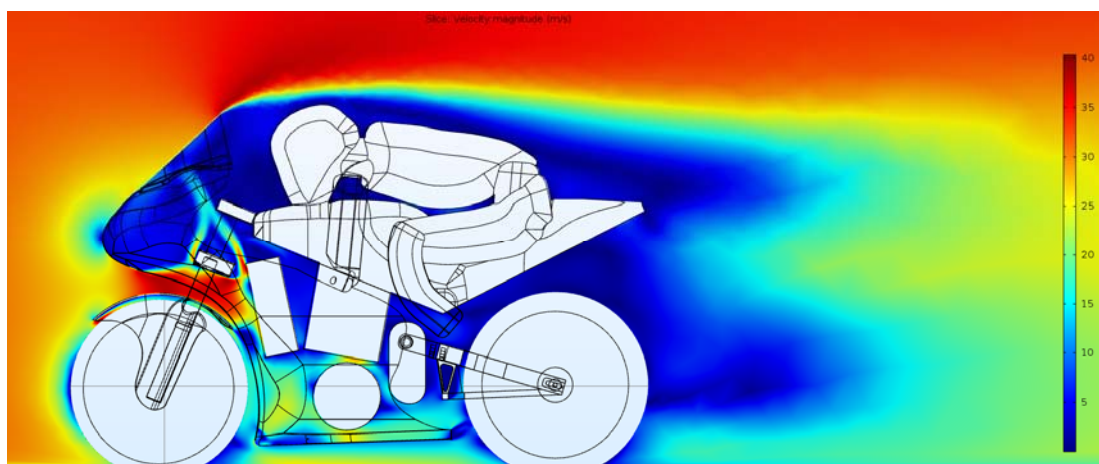


Figura 5.1.42: Simulación final - Velocidades en el plano central - Color indica velocidad en m/s

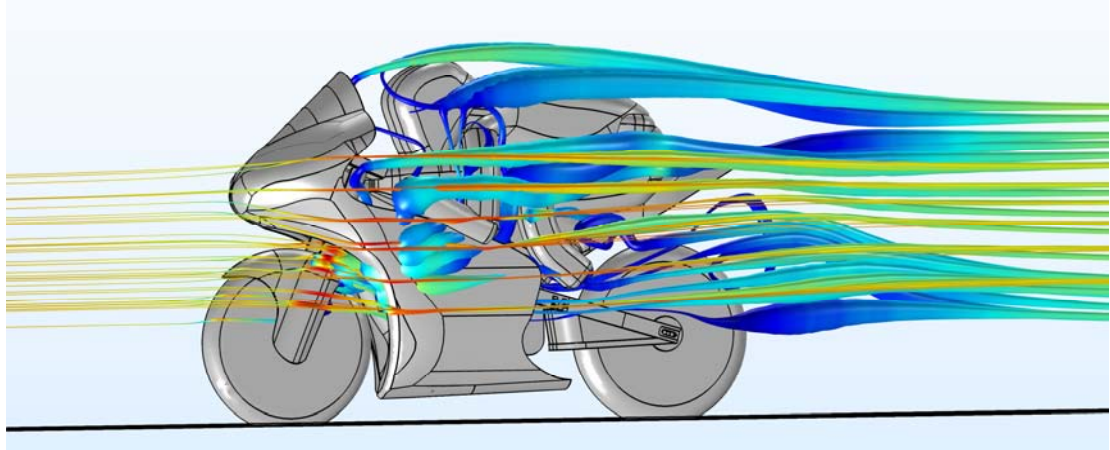


Figura 5.1.43: Simulación final - Líneas de corriente. Color indica velocidad en m/s y diámetro indica energía cinética turbulenta

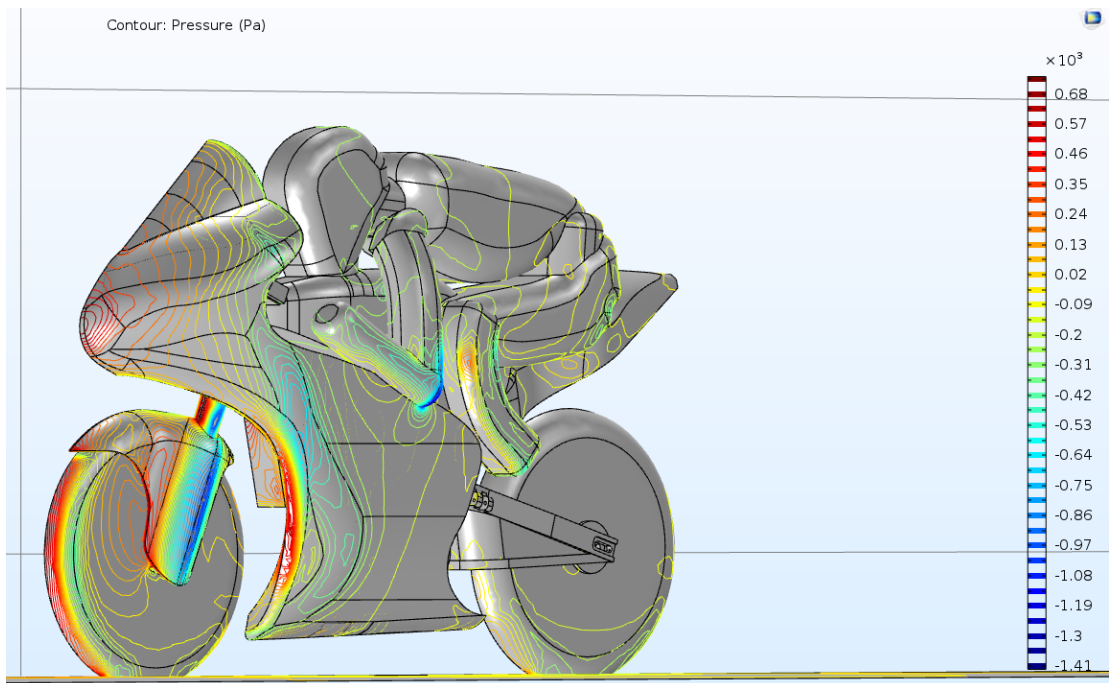


Figura 5.1.44: Simulación final - Isobaras. Color indica presión en Pas

En las simulaciones se puede ver que el carenado logró tener una forma suave, se logró evitar tener presiones muy altas en el frontal. Además, se puede observar que la cúpula logra cubrir a la piloto. En cuanto a los flujos internos, se puede ver que la zona del motor tiene buena circulación. También es posible visualizar los vórtices generados detrás de la moto en la figura con las flechas.

El error relativo en las variables calculadas es menor a 10^{-3} , siendo dichas variables: el índice de disipación turbulenta (ϵ), la energía cinética turbulenta (k), la presión y la velocidad.

Se obtuvo como resultante de fuerzas en el eje longitudinal 146.56 N a una velocidad de 120 km/h.

Cálculo del drag:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} * \rho * U_{\infty}^2 * A_F} = \frac{146.56 * N}{\frac{1}{2} * 1.225 * \frac{kg}{m^3} * \left(33,33 * \frac{m}{s}\right)^2 * 0.49 * m^2}$$

$$\boxed{C_D \cong 0.44}$$

Este coeficiente de drag parece elevado en comparación con el conocido en los automóviles, pero hay que tener en consideración dos cosas: Los coeficientes de drag de las motos se suelen encontrar entre 0,4 y 0,5 y que el error por el modelo del piloto sumado al error de las simulaciones puede modificar hasta un 10% el coeficiente.

5.2. Simulación Fluido Térmica – Motor

5.2.1. Cálculo: Calor a Disipar

Las pérdidas por calor en el motor se han calculado mediante la modelización del circuito de MotorLand Aragón (ver Figura 3.1.2). Se ha dividido el circuito en tramos en función del porcentaje del TPS (Throttle Position Sensor) y del tiempo que se tarda en recorrerlos. A continuación, se muestra una tabla resumen donde se recoge el tiempo total para cada tramo según el porcentaje del TPS para una vuelta del circuito.

<i>TPS [%]</i>	<i>Tiempo [s]</i>
100	35,2
75	6,7
60	0,5
40	12,6
30	9
15	7,6
0	67,9

Tabla 5.2.1: Throttle Position Sensor vs Tiempo de Motorland Aragón

Se supondrá el rendimiento de la ficha técnica del motor como una media de rendimiento en todo el rango de potencias, a pesar de no ser correcto. Para calcular la potencia consumida del motor se parte de la potencia mecánica en su eje (34kW según el test proporcionado por la competición, Anexo A1). Aplicando el rendimiento del motor, se obtendrá la potencia consumida por este. En este caso la potencia máxima consumida por el motor se asocia al 100% del TPS y se escalan los demás valores proporcionalmente. Se obtendrá la potencia de pérdidas medias a partir de la media ponderada de las pérdidas y su tiempo correspondiente.

TPS [%]	Tiempo [s]	Potencia consumida [W]	Rendimiento	Pérdidas [W]
100	35,2	34560	0,92	2764,8
75	6,7	25920	0,92	2073,6
60	0,5	20736	0,92	1658,88
40	12,6	13824	0,92	1105,92
30	9	10368	0,92	829,44
15	7,6	5184	0,92	414,72
0	67,9	0	0,92	0

Tabla 5.2.2: Pérdidas estimadas Motor en Motorland Aragón

Pérdidas medias [W]	979,18
Potencia consumida media [W]	12239,7

Tabla 5.2.3: Pérdidas en el motor

5.2.2. Planteo

Ya teniendo los datos de origen y el modelo 3D del motor utilizado se comenzó a estudiar la interacción con el flujo de aire que tenía este motor.

A partir de que la disposición del motor debía ser obligatoriamente longitudinalmente (ver Figura 5.2.1), generaba bastante curiosidad la interacción que tendrían las aletas frente a un flujo frontal, por lo que se comenzó con simulaciones meramente fluidodinámicas.

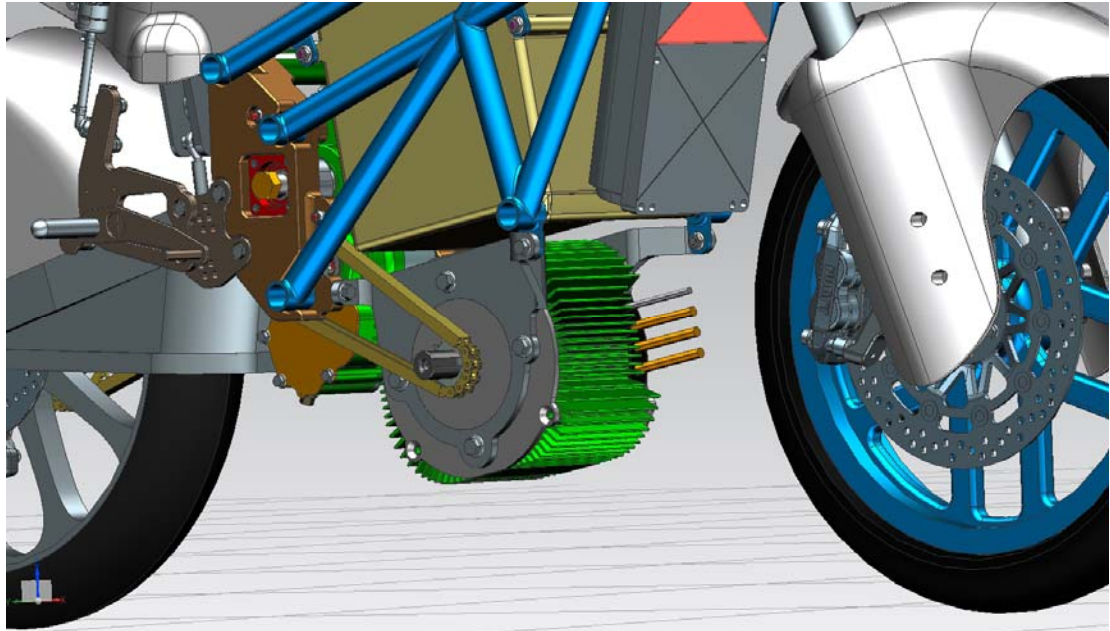


Figura 5.2.1: Ubicación y disposición motor en EPR01

5.2.3. Simulación 2D

Debido a que el motor tiene una geometría que se mantiene constante en el eje transversal, para empezar, se utilizaron simulaciones 2D, de esta forma sería posible ahorrar mucho tiempo y complejidades en los modelos. Estas simulaciones permitirían extender los valores obtenidos a toda la geometría del cuerpo y analizar los resultados.

Se utilizó como valor de entrada del flujo, la que sería la velocidad de la moto y a la pared derecha se le dio el movimiento que sería el del suelo.

Como procedimiento, se modelizaron las aletas como si fueran líneas y para las simulaciones iniciales se comenzó no teniéndolas en cuenta. Esto fue muy importante para alcanzar la convergencia del modelo, ya que después se pudieron utilizar esos valores como iniciales.

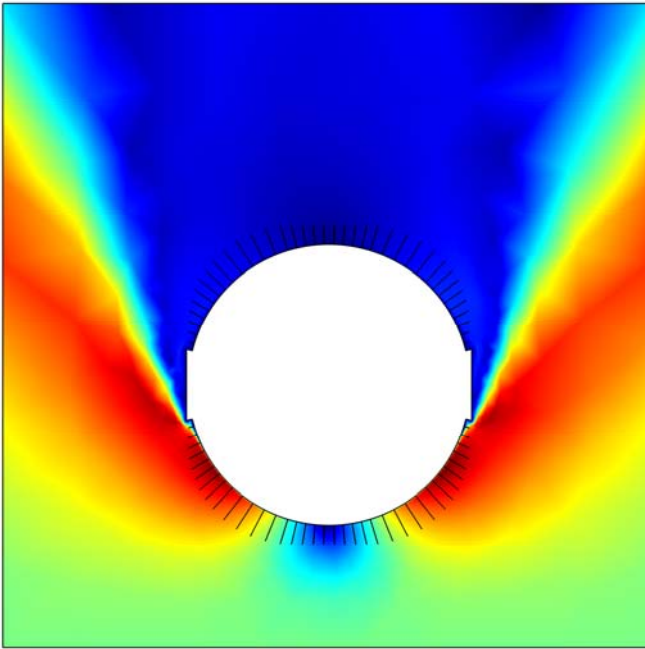


Figura 5.2.2: Simulación cualitativa sin considerar las aletas

Como resultados se pudo observar que dentro de las aletas el aire no tiene facilidad para fluir, por lo que parecería que la refrigeración por aire no sería muy efectiva. También permitió apreciar que en los aspectos aerodinámicos estas aletas modificaban la geometría eficaz del motor, convirtiéndolo en un cilindro más grande para los aspectos del drag. Esta conclusión es la que me llevó a simplificarlo de esa manera en el estudio aerodinámico final de la moto.

Surface: Velocity magnitude (m/s) Arrow Surface: Velocity field

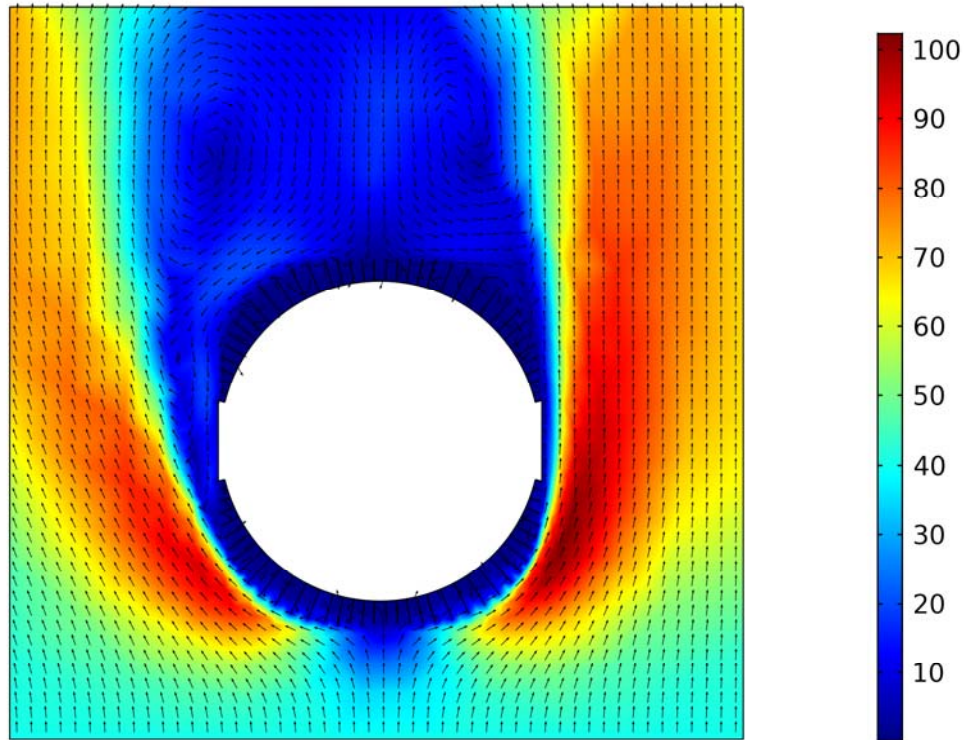


Figura 5.2.3: Simulación considerando las aletas y la turbulencia

5.2.4. Simulación 3D

Habiendo visto los resultados con las simulaciones 2D se quiso extender el trabajo al modelo tridimensional, para de esa forma ver mejor la interacción con el flujo y poder incluir los fenómenos que pasaran en los extremos del motor, sus caras no aletadas.

Así y todo, con el objetivo primordial de reducir los elementos, se realizaron simetrías ya que el comportamiento iba a ser el mismo. Para comenzar se hicieron simulaciones aerodinámicas para luego acoplar el intercambio de calor.

Se definieron los elementos en el modelo y en este caso, incorporé el material de la carcasa del motor, aluminio, ya que en las siguientes simulaciones iba a estudiar de qué forma conducía el calor y luego cuánto calor lograba evacuar.

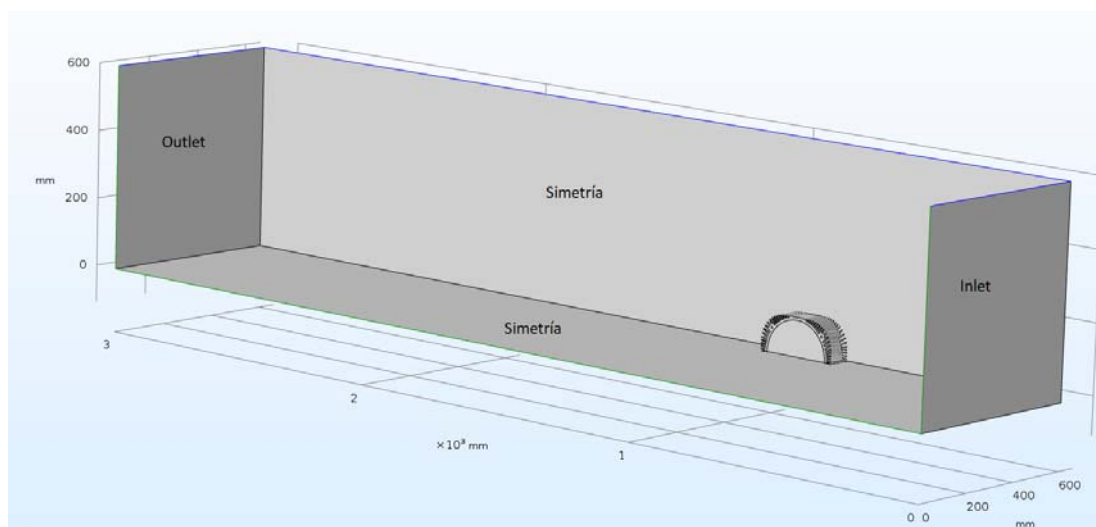


Figura 5.2.4: Elementos definidos para ensayo aerodinámico

De este estudio se pudieron ver los siguientes resultados:

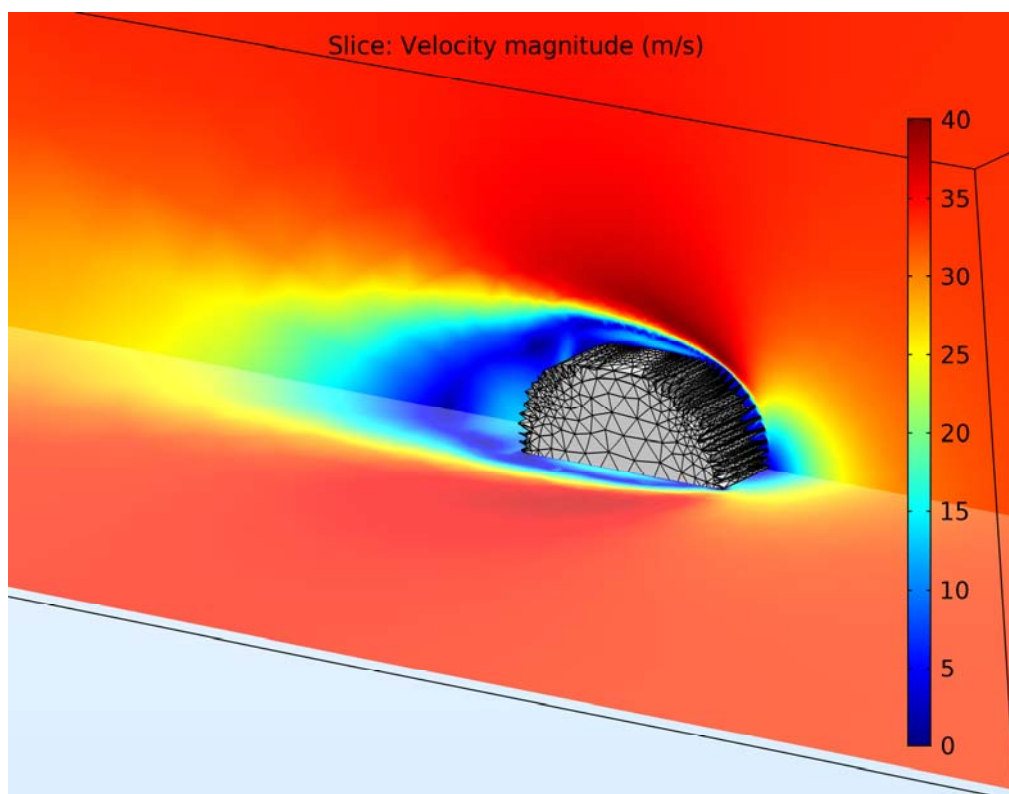


Figura 5.2.5: Simulación aerodinámica motor - Velocidades

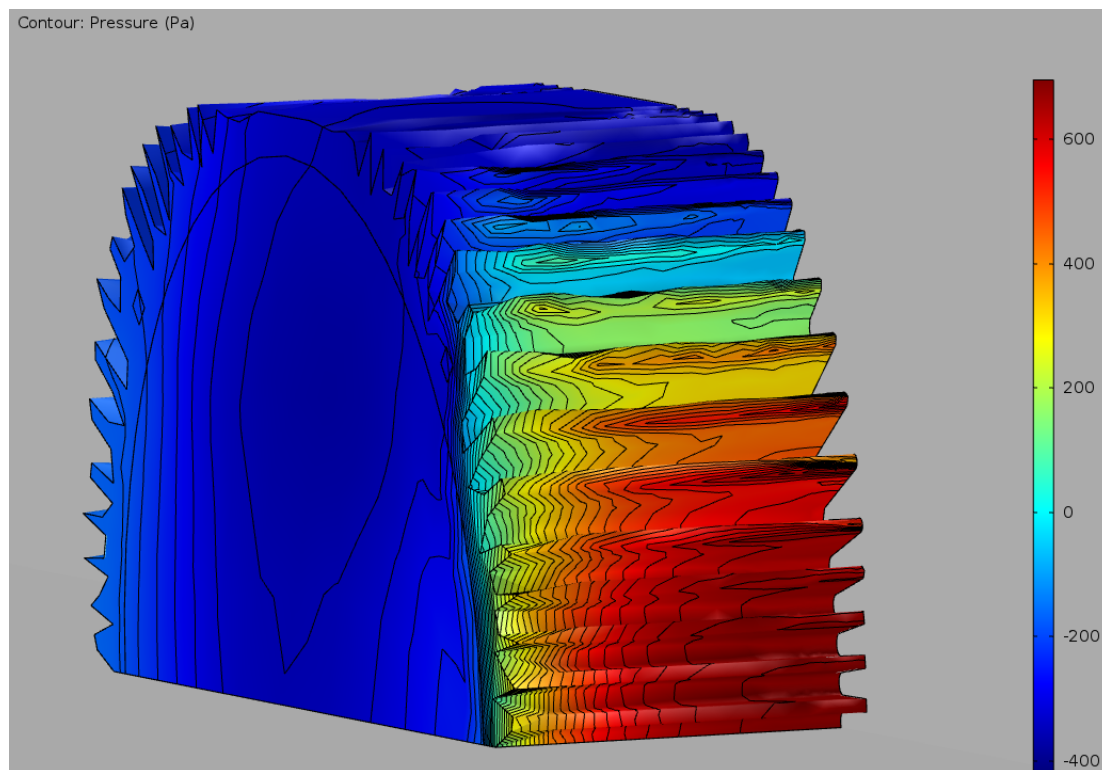


Figura 5.2.6: Simulación aerodinámica motor - Presiones

Como parecían comprometedores se pasó a la simulación de la transferencia de calor. Para esa simulación se tuvo que tener en cuenta el aporte de calor en la superficie interna del motor. Se impusieron 250W, siendo éstos un cuarto de la potencia calculada de pérdidas.

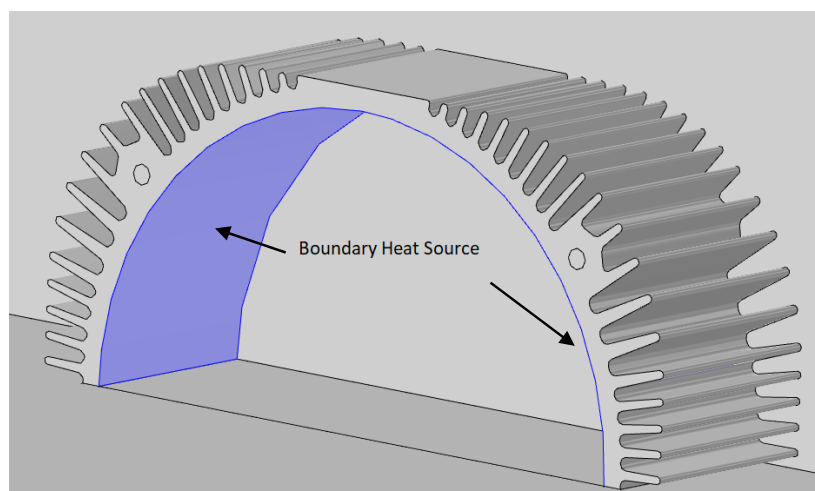


Figura 5.2.7: Definición adicional para estudiar la refrigeración

Se realizó un estudio estacionario para ver a qué temperatura máxima llegaría el motor, como medida precautoria. Si esta temperatura era menor a la máxima de funcionamiento no pasaría a la simulación transitoria. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

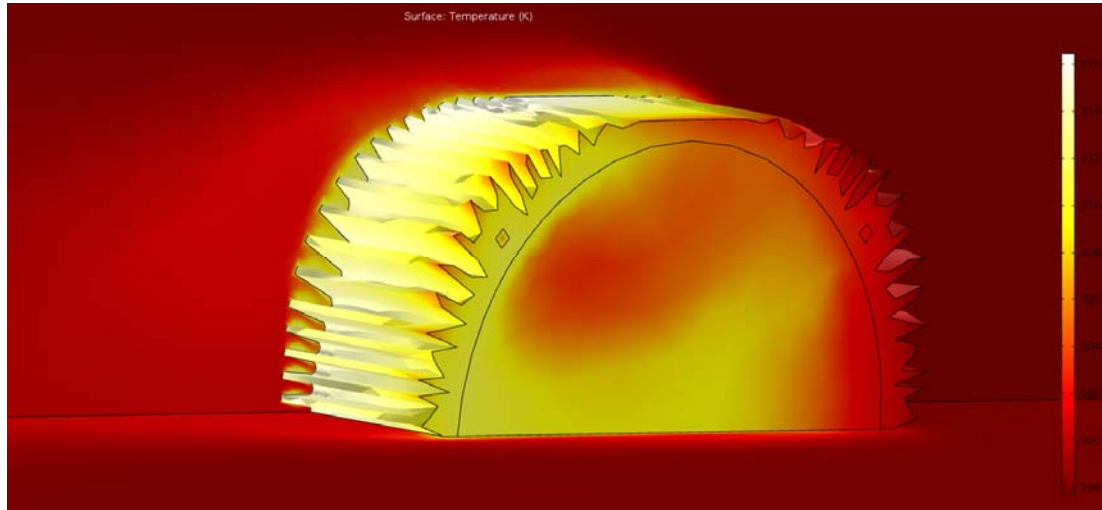


Figura 5.2.8: Simulación térmica del motor

$$\text{Temperatura máxima: } 316,46 \text{ K} = 43^{\circ}\text{C}$$

5.2.5. Conclusiones

Las simulaciones realizadas concluyeron en que la refrigeración no es necesaria, ya que la temperatura a la que se alcanza en un estacionario con las pérdidas de calor medias no superaba la temperatura máxima de trabajo del motor.

A pesar de ese resultado había dudas con respecto al rendimiento termodinámico del motor, sobre su curva de calentamiento y sobre la realidad de las simulaciones. El rendimiento térmico del motor varía con la potencia entregada, pero por culpa de desconocer el comportamiento exacto de este motor, no se avanzó más con el estudio. No se pudieron realizar ensayos de calentamiento a potencia completa por falta de un freno motor de esa potencia. A pesar de eso, se realizaron ensayos a baja entrega de potencia y el motor no presentó problemas de temperatura.

5.2.6. Simulaciones Adicionales

Como medida precautoria se diseñó una tubería para redireccionar el flujo de aire con el fin de aumentar la eficacia de las aletas y se realizaron simulaciones sobre este ducto. La idea fue diseñar una toma de aire que realizara el trabajo de cambiar la dirección del flujo, para que éste pase de forma paralela a las aletas del motor.

Se comenzó con el diseño en Siemens NX a partir del motor y el carenado que se tenía en ese momento diseñado. Para eso, se buscó que las curvas sean tan suaves como era posible y la toma de aire grande, para generar sobrepresión suficiente para que el aire pase entre las aletas. Con estos conceptos se logró el siguiente diseño:

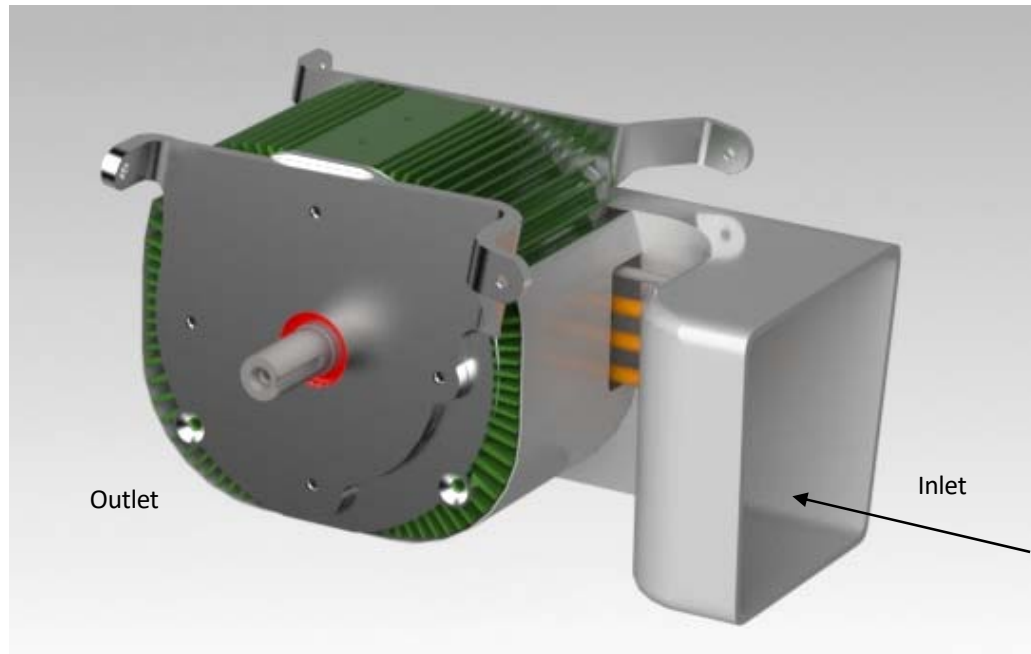


Figura 5.2.9: Ducto de redireccionamiento de Aire

A partir de este diseño se realizaron diversas simulaciones teniendo en cuenta distintas condiciones de flujo impuestas en la boca.

Primero se impuso una velocidad de flujo en la entrada, sacando este valor de las simulaciones aerodinámicas hechas previamente. De estas simulaciones se obtuvo la velocidad en esa zona. Dicha simulación arrojó estos resultados:

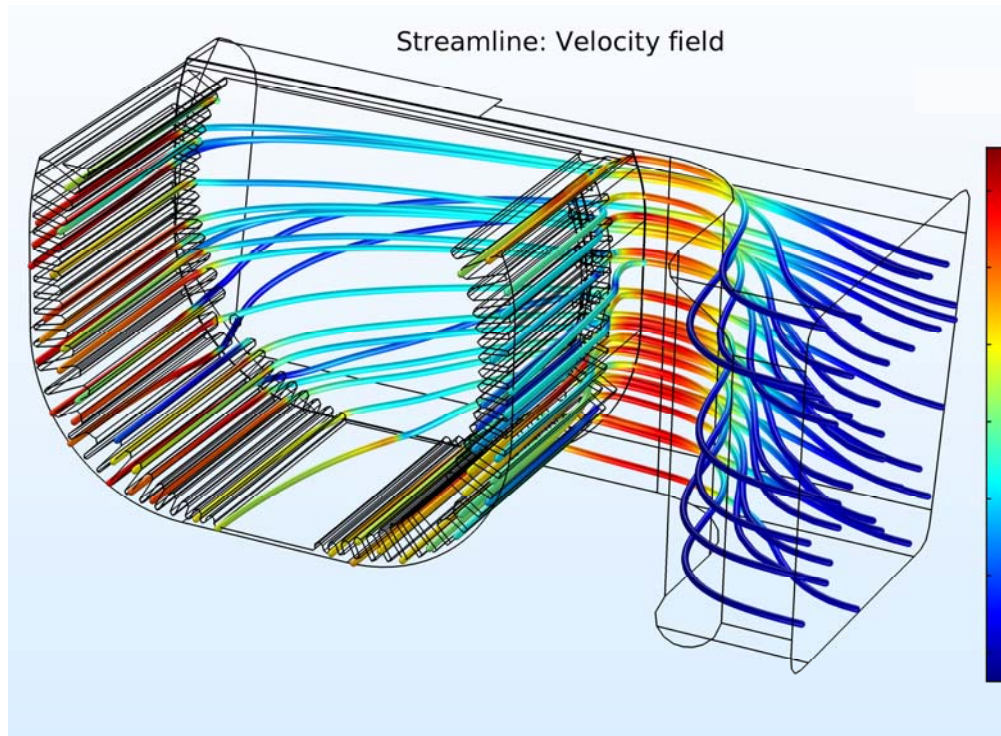


Figura 5.2.10: Simulación fluidodinámica de ducto con condición de caudal - Velocidades

Estos resultados eran incoherentes, el aire se aceleraba demasiado por la reducción de la sección y la imposición de un caudal. Alcanzaba una velocidad de 350 metros por segundo, lo que era una velocidad supersónica.

El error estaba en la condición de entrada del aire. En cambio, se impuso en la toma de aire una presión, ya que la velocidad del aire al fin y al cabo iba a ser definida por la resistencia del circuito, por lo que se buscó el valor de presión en esa zona (en la simulación aerodinámica), que eran unos 800 Pascales y se simuló con ese dato, obteniendo un resultado más real:

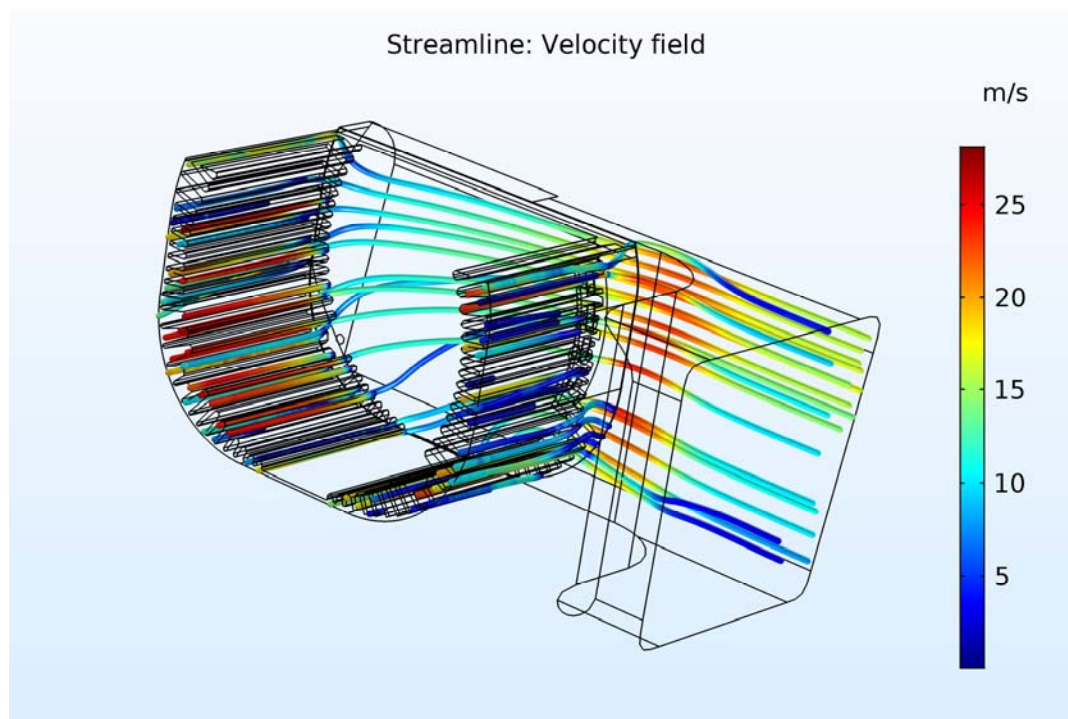


Figura 5.2.11: Simulación fluidodinámica de ducto con condición de presión - Velocidades

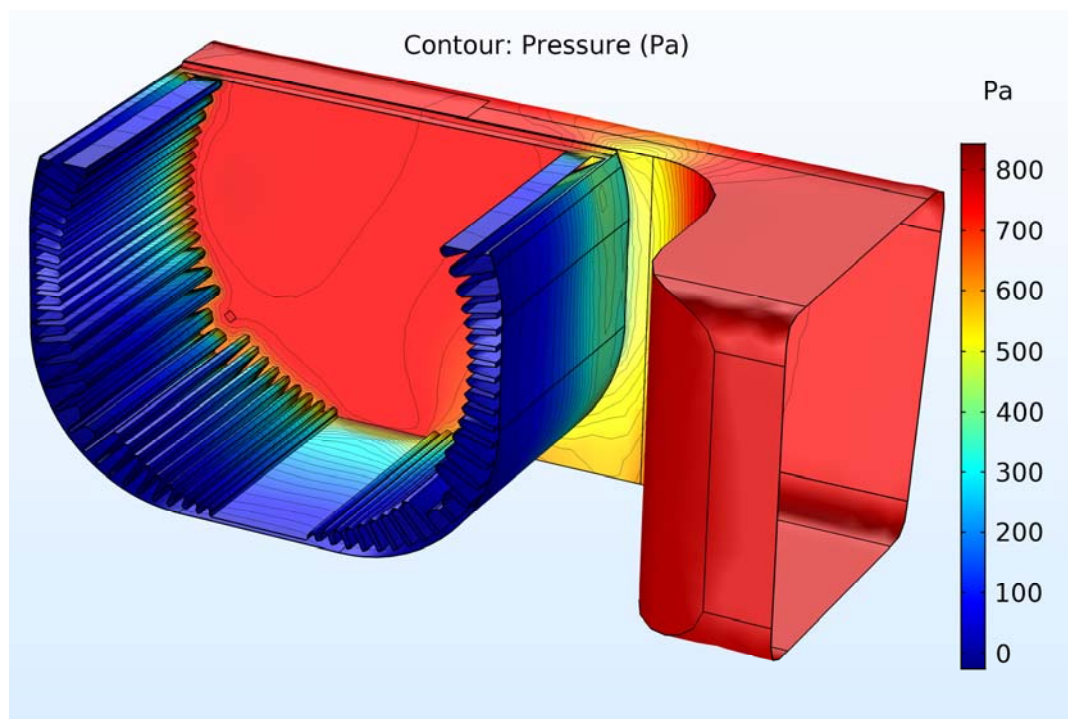


Figura 5.2.12: Simulación fluidodinámica de ducto con condición de presión - Presiones

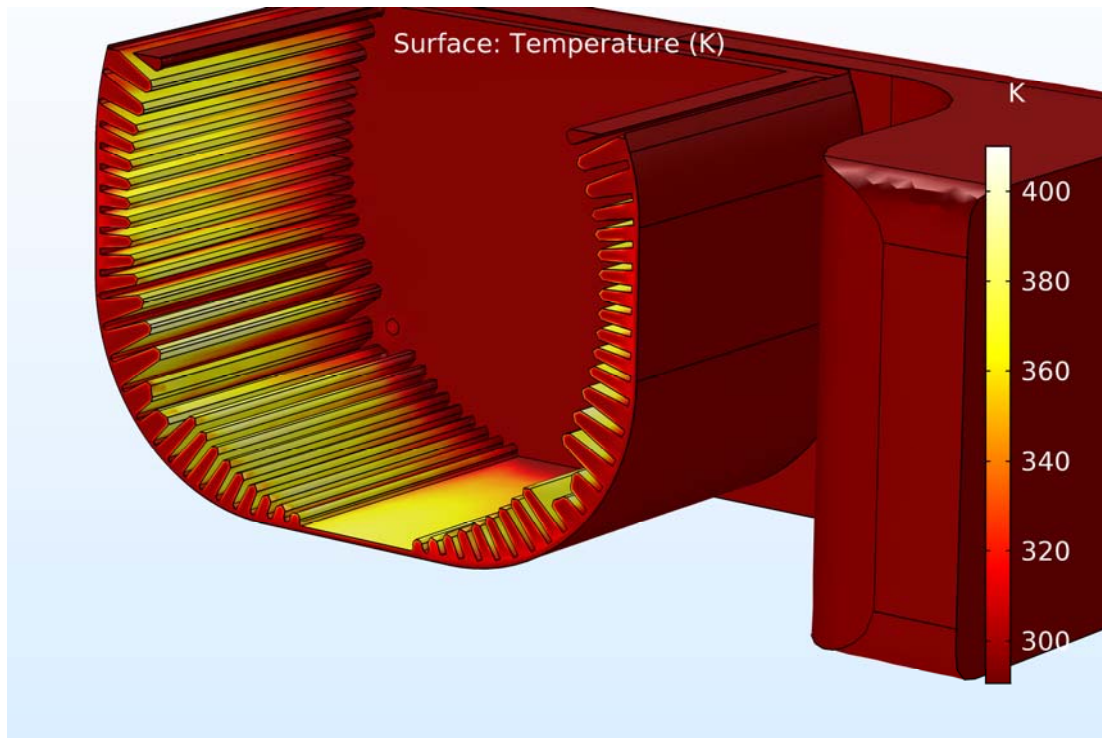


Figura 5.2.13: Simulación fluidodinámica y térmica de ducto con condición de presión – Temperaturas

Por lo observado en las simulaciones realizadas se logra que la temperatura del motor **no exceda los 133 °C**, lo que es una buena señal, ya que la temperatura límite es de 140 °C. Se logra el objetivo propuesto térmico sin contar el calor extraído por la tapa que quedaría a la vista.

Se recuerda que esta pieza fue diseñada por precaución y no para ser fabricada directamente. Al ser una moto de competición, todo el peso que se puede evitar, se evita. Quedará a la hora de las pruebas ver si habrá que utilizar esta solución propuesta.

5.3. Simulación Fluido Térmica – Battery Pack

5.3.1. Prueba Realizada

Se ha llevado a cabo una prueba de calentamiento a intensidad media de descarga prevista para la carrera de MotoStudent. La intensidad media calculada es de 185A, por lo que observando la configuración de las celdas 26S2P, cada celda se descarga a una media de 92,5A. En la Figura 5.3.1 se muestra como varía la temperatura con el tiempo descargando la celda a 89A (4C). Se observa una temperatura máxima de 50 °C, existiendo así, un margen de 20 °C hasta alcanzar la temperatura máxima permitida por el fabricante. De esta manera, se ha optado por no hacer refrigeración en el pack de baterías, y se prevé un espacio para esta en caso de que al hacer la validación con la motocicleta final sea necesario.

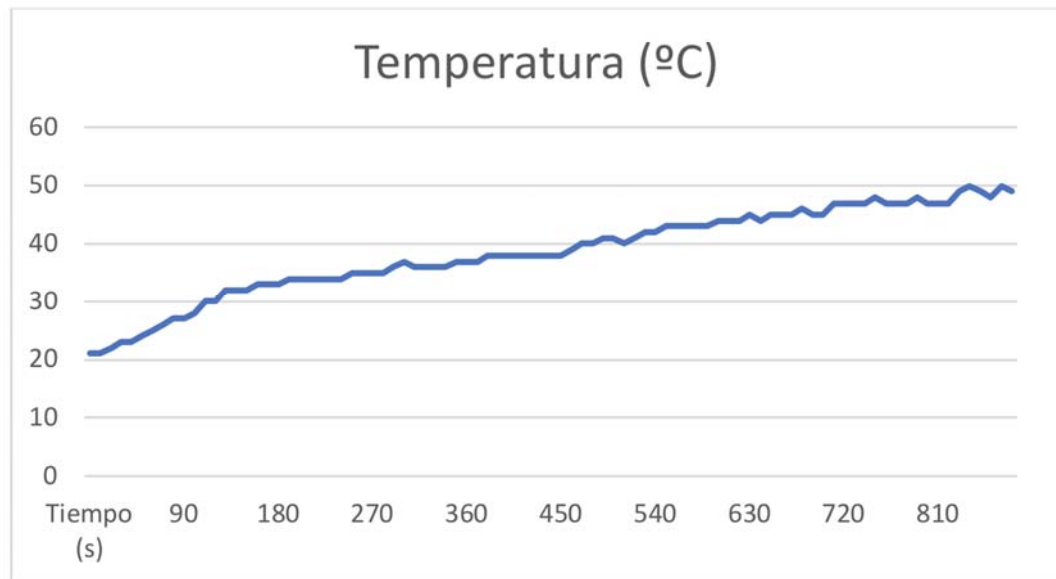


Figura 5.3.1: Evolución de la temperatura respecto al tiempo en descarga - Celdas

5.3.2. Desarrollo

A pesar de las pruebas se ha tomado la decisión de llevar a cabo ciertas simulaciones sobre el calor del battery pack y sobre las posibles refrigeraciones que se podrían utilizar. Al ir varias celdas juntas en un recinto tan pequeño generó dudas sobre la utilidad de la prueba realizada. Adicionalmente, no se encontró mucha información con respecto al calor que suelen generar celdas de este tipo.

El diseño tan compacto del battery pack dificulta fuertemente la circulación del aire dentro, lo que hace que su refrigeración sea complicada. Por este motivo se plantearon varias estrategias.

Refrigeración a través de ductos verticales

Como se puede ver en la siguiente figura, el battery pack cuenta con dos columnas (en rojo) con la función de contener a las celdas y evitar su posible desplazamiento. En un comienzo se pensó en utilizar estas columnas, que ya son huecas, para introducir el aire una y para sacarlo la otra. De esa forma, si se diseñaba una toma de aire al frente, no sería tan complejo entubar el aire hasta un agujero ubicado en su inferior.

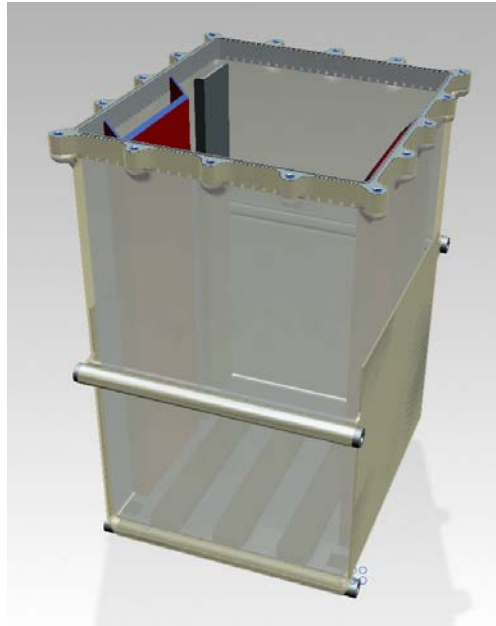


Figura 5.3.2: Modelo CAD de la caja del battery pack con ductos

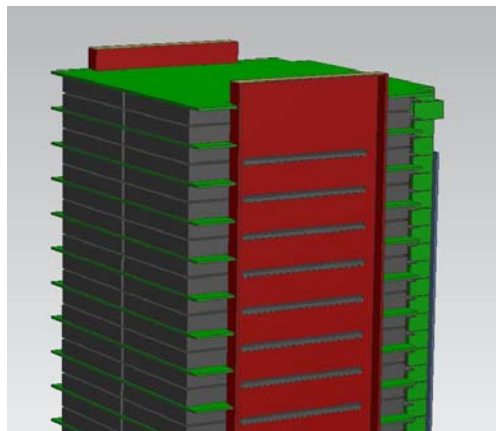


Figura 5.3.3: Detalle del modelo en CAD de los ductos agujereados del battery pack

De esa forma, realizando agujeros en el lateral de la columna, como se puede ver en la Figura 5.3.3, el aire pasaría a través del gap que hay entre celda y celda.

A este punto no se había diseñado ninguna boca de aire porque primero se quería analizar si el aire pasaría por dentro del pack, por lo que se prefirió agilizar y ver resultados antes de perder tiempo en diseño de otro componente. Además, para realizar la simulación iba a ser más ágil analizando solo el flujo dentro, y no estudiando el ducto y dentro.

A partir de este diseño, bastante sencillo, lo primero que se tuvo que hacer fue reducir el archivo de CAD del pack de baterías a lo mínimo posible. Esto es clave, especialmente considerando que este componente cuenta de muchísimos componentes como conectores, chips, tornillos, cables y agujeros. El procedimiento constó de borrar todo lo que podría dificultar la convergencia, hasta incluso eliminar varios redondeos para que sea todo más simple.

Después de terminada esa etapa quedó lo siguiente:

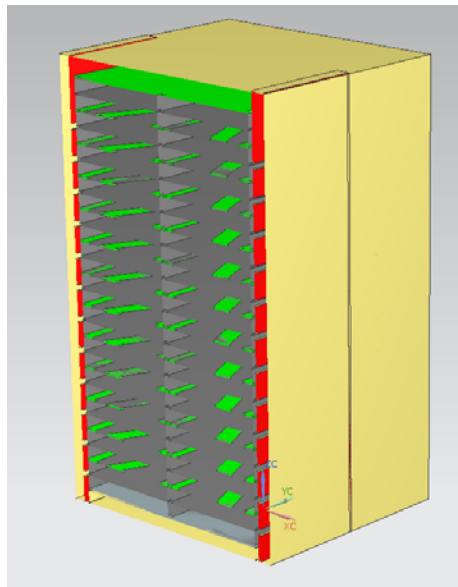


Figura 5.3.4: Modelo CAD del battery pack simplificado para simulación

Como se puede ver, se redujo mucho el modelo, especialmente comparando con lo visto en la Figura 3.6.3.

Tras importar el modelo a Comsol se realizaron las primeras simulaciones únicamente de la mecánica de fluidos. Ya con la experiencia de la refrigeración del motor se comenzó simulando con condición de presión en la boca. Se estudiaron dos tipos de flujos distintos: primero el estudio laminar, que dadas las bajas velocidades esperadas se creyó que funcionaría bien y también se hizo una prueba de flujo

turbulento. Esta prueba, se llevó a cabo con el modelo L-VEL, ya que por lo explicado en el capítulo 4.3.1 Estudio de Turbulencia, era el más óptimo.

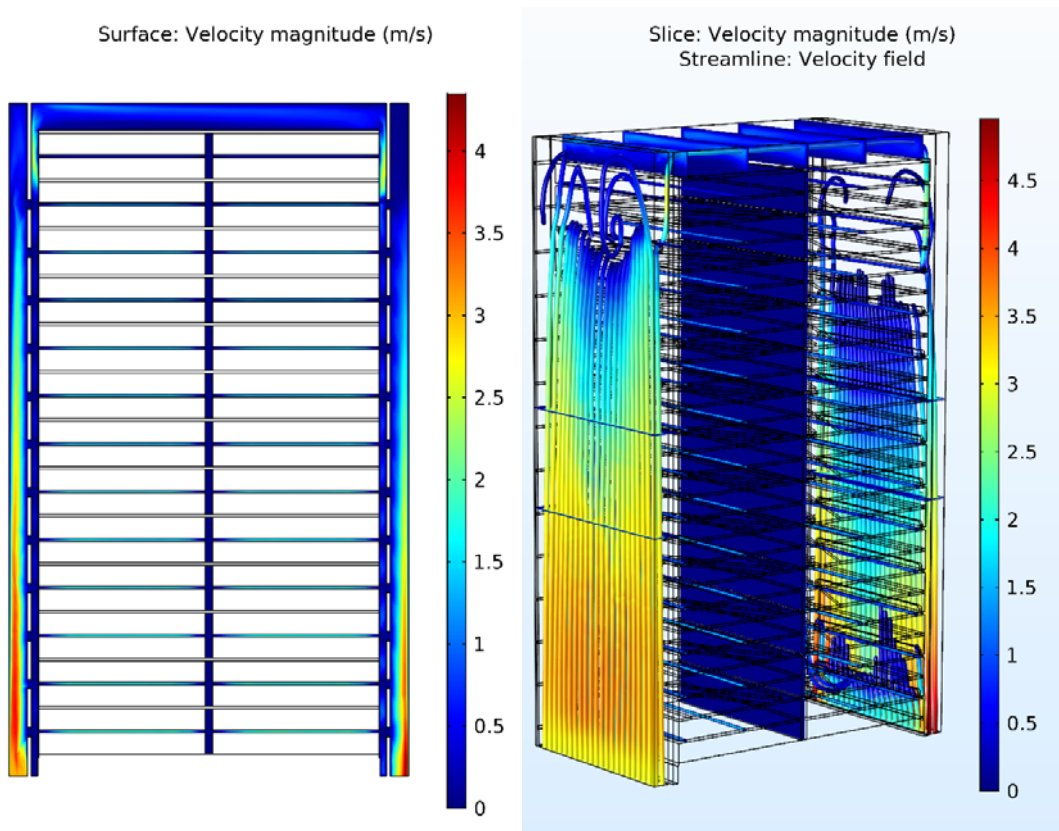


Figura 5.3.5: Simulación aerodinámica ductos battery pack: izquierda vista en corte, derecha vista 3D

En la simulación se pudo observar que el aire circulaba muy poco, de hecho, las líneas de corriente apenas cruzan el pack. A partir de los resultados se decidió esperar a la validación, debido a la duda sobre la generación de calor de las celdas. En caso de ser necesario, se reservaron volúmenes para montar un ventilador de extracción y un filtro de entrada.

En este caso no se avanzó al estudio térmico, debido a que no se pudo obtener ningún dato sobre el calor generado por las celdas.

5.4. Simulación Fluido Térmica – Inversor

5.4.1. Cálculo - Calor a disipar

De la misma forma que en el caso del motor, la potencia a disipar en el inversor se ha calculado a partir de la modelización del circuito de MotorLand Aragón.

Se aproximará el 100% del TPS a la intensidad máxima del inversor (550A RMS) y se escalarán linealmente las intensidades para los porcentajes de TPS restantes. Para cada una de las intensidades resultantes se obtendrá la potencia perdida correspondiente. A partir de estas potencias y realizando una media ponderada con los tiempos resultará una primera aproximación de las pérdidas medias para una vuelta al circuito.

Además, se calcula el rendimiento considerando que la potencia entregada por el inversor es igual a la consumida por el motor.

TPS [%]	Tiempo [s]	PL,invertir [W]	Potencia consumida [W]	Rendimiento [%]	Pérdidas [%]	Potencia entregada [W]
100	35,2	7698,0	42258,0	81,8	18,2	34560,0
75	6,7	4722,7	30642,7	84,6	15,4	25920,0
60	0,5	3274,6	24010,6	86,4	13,6	20736,0
40	12,6	1737,1	15561,1	88,8	11,2	13824,0
30	9	1138,0	11506,0	90,1	9,9	10368,0
15	7,6	448,3	5632,3	92,0	8,0	5184,0
0	67,9	0,0	0	0,0	0,0	0,0

Tabla 5.4.1:Cálculo de potencia perdida - Inversor

Potencia perdida media [W]	2435,7
Potencia media consumida [W]	14675,4
Rendimiento medio inversor [%]	83,40

Tabla 5.4.2:Cálculo de potencia media perdida - Inversor

5.4.2. Simulación Realizada

Con los datos obtenidos se procedió a modelar la refrigeración del inversor. Siendo una geometría prácticamente de placa plana, con espesor chico, se tomó la decisión de hacer un modelo 2D, que sería rápido y hacer algo más complejo no sería necesario.

Se tomaron las dimensiones reales del inversor y se colocó solo en el túnel de ensayo, respetando la disposición original (Figura 5.1.21). Con el valor de la velocidad del aire de la simulación del carenado, se impuso el flujo de 112 km/h y se acopló el calor que generaba. En este caso, el flujo de aire se considera **compresible** ya que hay una variación de temperatura, lo que altera las propiedades del fluido. Como modelo se utilizó el k- ϵ debido a su rápida convergencia.

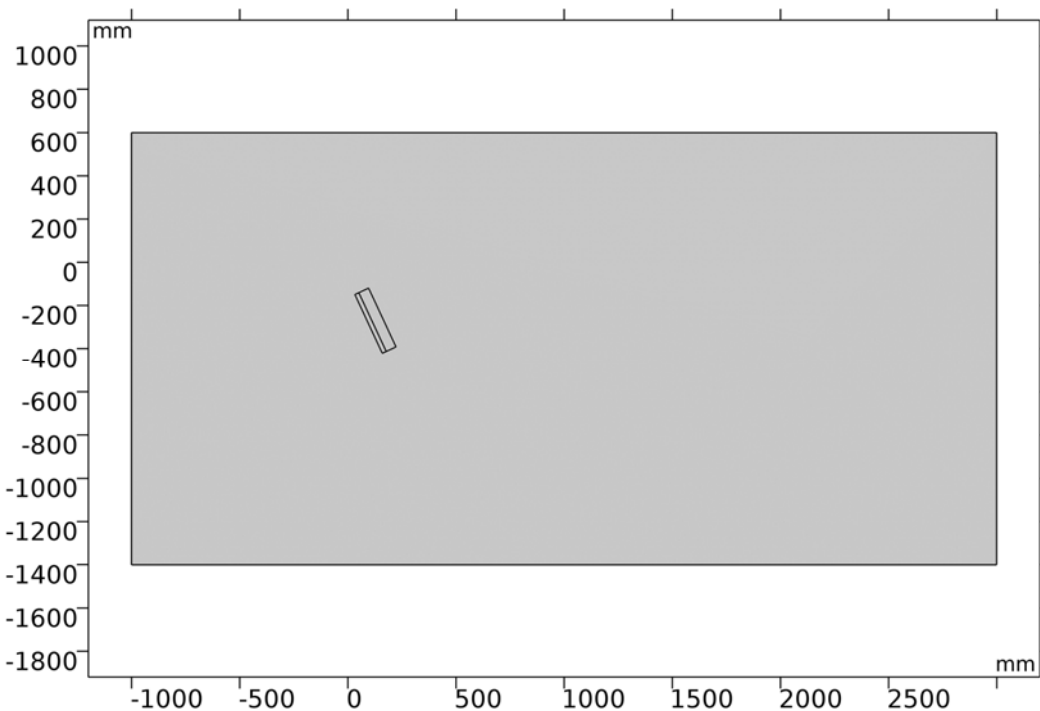


Figura 5.4.1: Modelo 2D del inversor en Comsol

Ya que el inversor tiene una placa de aluminio de 20 mm, se modeló y se introdujo el aporte de calor entre el aluminio y la carcasa plástica.

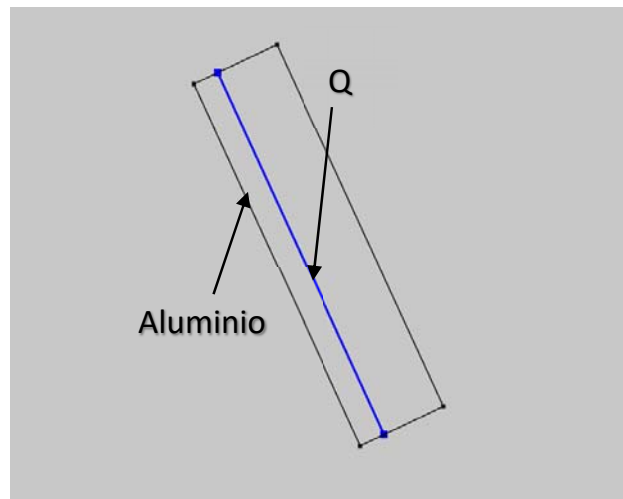


Figura 5.4.2: Modelo 2D del inversor en Comsol - Detalle

Tras la simulación se aproximó que la temperatura que alcanzaría el aluminio sería de 165 °C, lo que superaría el calor máximo que puede soportar el componente.

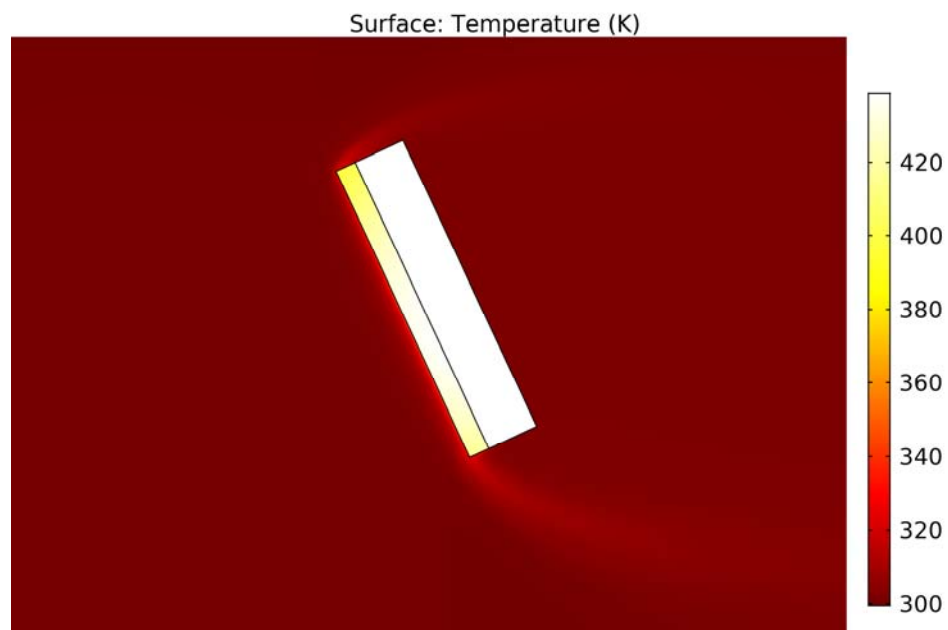


Figura 5.4.3: Simulación térmica del inversor

Con esos valores, se encaminó a estudiar el transitorio, para poder observar en cuánto tiempo alcanzaría esa temperatura. Esto es muy importante, y más en el ámbito de la competición, donde las carreras tienen un periodo de tiempo más o menos definido y se busca llevar los componentes al máximo.

Del estudio transitorio se obtuvieron los siguientes valores, imponiendo el calor de entrada como una rampa en el segundo 1:

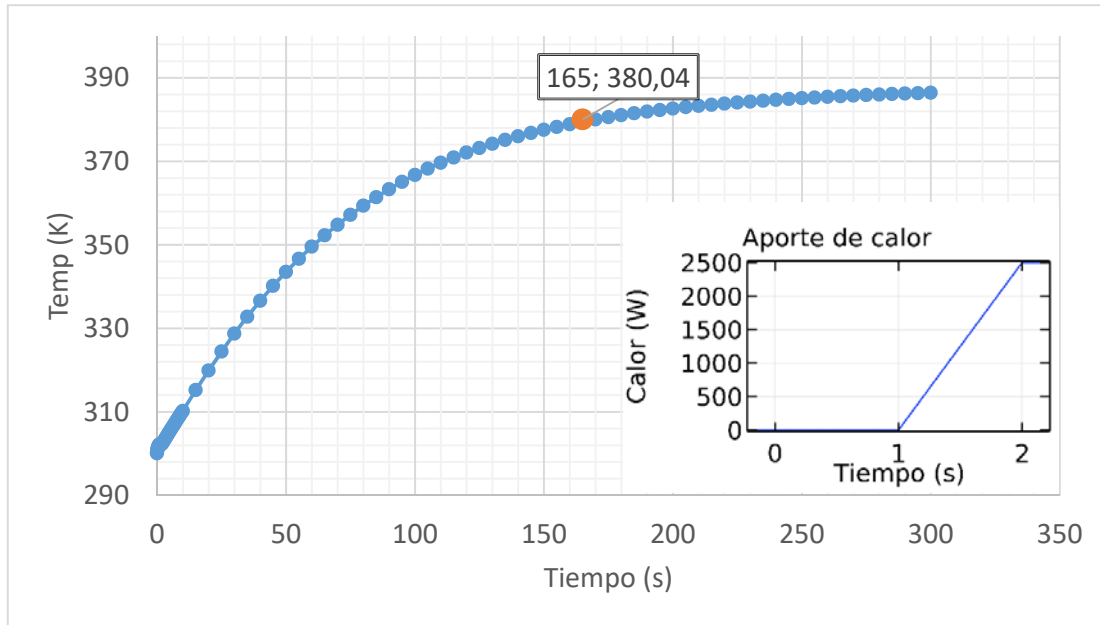


Tabla 5.4.3: Simulación del calentamiento del inversor

A partir de estos resultados y viendo que la temperatura máxima admisible para el inversor es de 380K, se ha propuesto emplear una superficie aletada sobre el inversor. De esta forma aumentará el intercambio de calor. A pesar de esto no ha sido seleccionada por dos motivos: Se intentarán validar los datos obtenidos analíticamente a la hora de poder probar el componente y se buscará reducir el peso de las aletas lo máximo posible. Esto deja la elección de las aletas a la hora que se pueda probar la moto. Por otro lado, se han observado equipos de años anteriores y ninguno ha utilizado refrigeración por aletas siquiera, lo que hace dudar si el calor generado al fin de cuentas es menor.

5.5. Costo Computacional

Para realizar algunas pruebas, se ha podido utilizar el clúster del que dispone la universidad. Teniendo éste, más recursos que una computadora común, se realizaron las mismas simulaciones para poder comparar los tiempos de cálculo.

Se empleó como simulación para benchmarking la “simulación final”, siendo ésta la simulación sobre el carenado definitivo, debido a su complejidad y tamaño del modelo.

Física	Malla	Nº de Elementos	RAM Clúster	Tiempo Clúster	RAM Normal	Tiempo Normal
Laminar	Extremely Coarse	394.168	11,33 GB	11 min, 36 seg	5,59 GB	26 min, 14 seg
Turbulento	Extremely Coarse	394.168	9,84 GB	53 min, 17 seg.	5,18 GB	1 hr 54 min
Turbulento	Extra Coarse	739.098	13,07 GB	54 min, 10 seg.	6,98 GB	2 hs 3 min
Turbulento	Coarse	2.377.202	N/D	N/D	13,26 GB	8 hs 17 min
Turbulento	Normal	5.376.817	N/D	N/D	21,26 GB	2 días 2 hr

Tabla 5.5.1: Comparación tiempo y RAM entre clúster y computadora normal

A pesar de que no se pudieron terminar las pruebas, por problemas con el clúster y falta de tiempo, se puede observar en las simulaciones realizadas que el clúster procesa las simulaciones en casi la mitad del tiempo.

Esto es muy interesante, especialmente para empresas que busquen realizar muchas simulaciones. Como ventaja del clúster se puede ver, no solo la reducción del tiempo, sino la disponibilidad de esta unidad para toda la empresa.

Actualmente, el costo de un clúster con capacidades similares se encuentra alrededor de los €12.000, que a la hora de comparar con adquirir múltiples workstations es un precio bastante competitivo.

6. Análisis de Impacto Ambiental

Normalmente, este capítulo está orientado al impacto ambiental de la implementación de lo que se desarrolle en el TFG. Dado a que este trabajo está enfocado en una motocicleta de competición y especialmente en no exceder los límites térmicos y mejorar la aerodinamia de ésta, se ha propuesto avanzar con otro enfoque. Este capítulo hablará sobre el impacto ambiental que tiene realizar este tipo de estudios.

Primero se calculará el consumo eléctrico que implica utilizar un Workstation durante las horas descritas en el presupuesto, siendo su consumo de 260 W al estar activa³. Con ese dato de partida, los coeficientes de emisión de CO₂ obtenidos de la Oficina Catalana de Canvi Climàtic, serán utilizados para obtener los kgs de CO₂ emitidos. Se podría incorporar las emisiones que conlleva el transporte hacia el ámbito de trabajo y la energía eléctrica consumida en climatización e iluminación, aunque a mi parecer son emisiones que se hubieran hecho independientemente del trabajo.

Se ha confeccionado la siguiente tabla:

Detalle	Tiempo Utilizado [horas]	Consumo [kWh/hora]	Total Consumido [kWh]	Factor de emisiones [kg CO ₂ /kWh]	Emisiones totales [kg CO ₂]
Workstation	530	0.26	137,8	0,392	54,02 kg de CO ₂

Tabla 5.5.1: Cálculo del impacto ambiental del proyecto

Otra perspectiva que se puede comentar sobre el trabajo, es que la reducción de la resistencia al avance en los medios de movilidad es un factor importante en la reducción de las emisiones y del consumo energético, entre otros. A pesar de que en la moto que será aplicado el estudio, esto no será lo primordial, esta práctica puede aplicarse a cualquier vehículo que se desplace a través del aire.

³ Dato extraído de HP Workstation

7. Presupuesto

En este apartado se realizará un estudio económico de la realización de este trabajo, teniendo en cuenta el tiempo necesario para realizarlo para realizarlo, el costo de los programas utilizados.

Este trabajo fue realizado por lo que en el mercado puede ser considerado como un ingeniero Junior, el que cobra 25€ por hora. Un ingeniero Junior es aquel que ha terminado la carrera y cuenta con los conocimientos básicos, por lo que le falta aprender aún cosas específicas de cada campo laboral, por lo que tiene ciertas horas dedicadas al aprendizaje y luego ciertas horas dedicadas al trabajo en sí.

Con estos conceptos se formuló la siguiente tabla:

Detalle	Unidades	Precio por unidad	Precio Total
Aprendizaje Autónomo	150 horas	25€	3750 €
Realización modelos 3D	20 horas	25€	500€
Realización de las simulaciones	250 horas	25€	6.250€
Análisis de resultados	80 horas	25€	2.000
Tiempo de uso ordenador	300 horas a 0,26 kWh	0.13 €/kWh	10,14€
Ensayos	10 horas	25 €	250€
Confección de Memoria	90 horas	25€	2250€
Subtotal de servicios			15.010€
Comsol Multiphysics (con módulos utilizados)	1 licencia	12.000 €	12.000€
Siemens NX	1 licencia	7.500 €	7.500€
Workstation	1 unidad	1.600 €	1.600€
COSTO TOTAL			36.110€

Tabla 5.5.1: Cálculo de costo del proyecto

A pesar de este costo total, se puede considerar que las licencias de los programas y la Workstation son costos amortizables y teniendo estas herramientas se pueden hacer muchos más proyectos como éste, por eso se decidió separar el subtotal de servicios.

Conclusiones

En este trabajo se ha logrado modelizar los carenados de la moto con éxito, permitiendo mejorar el diseño, generar material de referencia y procedimientos para este campo. Se ha podido validar de forma teórica el cumplimiento de los requerimientos térmicos de la EPR01, sin olvidarse del diseño aerodinámico.

Además, se ha podido modelizar y simular, los efectos térmicos generados por los componentes esenciales de una motocicleta eléctrica, dejando documentado el método empleado. En cada uno de estos estudios se ha podido entrar en detalle de las dificultades encontradas y las tácticas para superarlas.

Se ha permitido ver una de las grandes aplicaciones y ventajas de la simulación en el campo de la mecánica. A partir de la información extraída de las simulaciones, se ha podido decidir caminos a seguir, sin la necesidad de tener piezas fabricadas, ni inferir en grandes costos de dinero. En algunos casos, sin embargo, estas simulaciones no nos han dado una respuesta, sino más bien, una estimación de qué esperar a la hora de tener las piezas fabricadas. Además, los tiempos de cálculo computacional han sido optimizados estudio a estudio, permitiendo ahorro de tiempo y de costo.

Los objetivos se han cumplido y se ha generado una base para cualquiera que quiera realizar estudios similares o iniciarse en el mundo de la simulación de mecánica de fluidos o transferencia de calor.

Futuro

Este estudio fue realizado en un marco temporal estrecho, teniendo muchas tareas a realizar. Los requerimientos de la competición sumado a la variedad de tareas son los responsables. Adicionalmente, cada componente analizado en este trabajo es de relevancia tal, como para estudiarlo de forma independiente, que no fue el caso.

En caso de seguir estudiando este caso, se podrían realizar más iteraciones de diseño de cada componente. Ver cómo se puede mejorar en detalle y comparar múltiples diseños antes de llegar al diseño final.

Adicionalmente, este estudio se ha basado casi puramente en la simulación, por lo que no ha permitido la validación real de los resultados. La validación real será en el momento en que la moto esté fabricada y se puedan realizar las pruebas correspondientes.

Bibliografía

- [1] Motostudent. Home. En: Motostudent Moto Engineering Foundation [en línea]. 2018. Disponible en: <<http://motostudent.com/index.html>>
- [2] Moto Engineering Foundation Reglamento V Competición Internacional MotoStudent. [en línea]. 2018. Disponible en: <www.motostudent.com>.
- [3] Torres, Ricardo. "Introducción: Dinámica de Fluidos Computacional". Ingeniería de Fluidos. UPC, 2017.
- [4] Comsol. Navier-Stokes equations. "What are the Navier Stokes equations?". De Comsol [en línea]. [Publicado: Enero 15, 2015. Editado: Febrero 22, 2017]. Disponible en: <<https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations>>
- [5] Comsol. The Finite Element Method (FEM). "Detailed Explanation of the The Finite Element Method (FEM)". De Comsol [en línea]. [2018]. Disponible en: <<https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>>
- [6] Frei, Walter. " Solutions to Linear Systems of Equations: Direct and Iterative Solvers" [Comsol Blogs]. [en línea]. 11 de noviembre de 2013. [Consultado: Mayo de 2018]. Disponible en: <<https://www.comsol.com/blogs/solutions-linear-systems-equations-direct-iterative-solvers/>>
- [7] Frei, Walter. "Improving Convergence of Multiphysics Problems" [Comsol Blogs]. [en línea]. 23 de diciembre de 2013. [Consultado: Mayo de 2018]. Disponible en: <<https://www.comsol.com/blogs/improving-convergence-multiphysics-problems/>>
- [8] Torres, Ricardo. "Introducción: Dinámica de Fluidos Computacional". Ingeniería de Fluidos. UPC, 2017.
- [9] Frei, Walter. " Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application?" [Comsol Blogs]. [en línea]. 6 de julio de 2017. [Consultado: Mayo de 2018]. Disponible en: <<https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>>
- [10] Rogers, E. R. Menter, F. Durbin, P. Nagi, N. M. "A Comparison Of Turbulence Models In Computing Multi-Element Airfoil Flows". NASA. AIAA Paper 94-0291
- [11] Subodh. "Which turbulence models are suitable for CFD analysis on a streamlined vehicle body?" [StackExchange]. [en línea]. 30 de enero de 2015. [Consultado: Mayo de 2018]. Disponible en: < <https://engineering.stackexchange.com/questions/336/which-turbulence-models-are-suitable-for-cfd-analysis-on-a-streamlined-vehicle-b>>
- [12] Wasserman, Shawn. " Choosing the Right Turbulence Model for Your CFD Simulation" [Engineering.com]. [en línea]. 22 de noviembre de 2016. [Consultado: Mayo de 2018]. Disponible en: <<https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx>>
- [13] Lyu, Peter. " How Do I Compute Lift and Drag?" [Comsol Blogs]. [en línea]. 16 de junio de 2015. [Consultado: Mayo de 2018]. Disponible en: < <https://www.comsol.com/blogs/how-do-i-compute-lift-and-drag/>>
- [14] Manuel Arias-Paz. Motocicletas. 33ª edición 2009. ISBN 9788496437265

Anexo A: Datasheets

A1. Motor

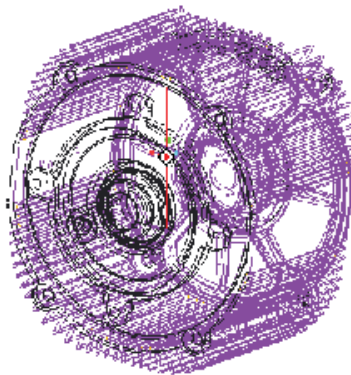


V International Competition MotoStudent

2017 - 2018



ME-MS1718 OFFICIAL ELECTRIC MOTOR
TECHNICAL SPECS



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est



V INTERNATIONAL COMPETITION MOTOSTUDENT 2017-2018

ME-MS1718 OFFICIAL ELECTRIC MOTOR

Motenergy and MEF Technologies have developed the ME-MS1718, the Official Electric Motor for the V International Competition MotoStudent 2017-2018. All teams registered in the Category MotoStudent Electric will receive a unit of this motor within their MotoStudent Kit, compulsory to install in their prototypes.



GENERAL CONSIDERATIONS

The ME-MS1718 Official Electric Motor supplied will be sealed by the MotoStudent Organization to avoid internal manipulations, as reflects Art. D.2.1 of the Technical Regulations.

These seals will avoid the opening of the crankcases and covers, and must be intact at the moment of participation at the Final Event in Autumn 2018. These seals will strictly checked at the Static Scrutineering.

ANY BROKEN OR DAMAGED SEAL WILL BE REASON FOR TECHNICAL NON-CONFORMITY

In case of breakdown or malfunction of any internal part, please contact the Organization to take the appropriate solution.

POWERED BY



#TheRaceofEngineers



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

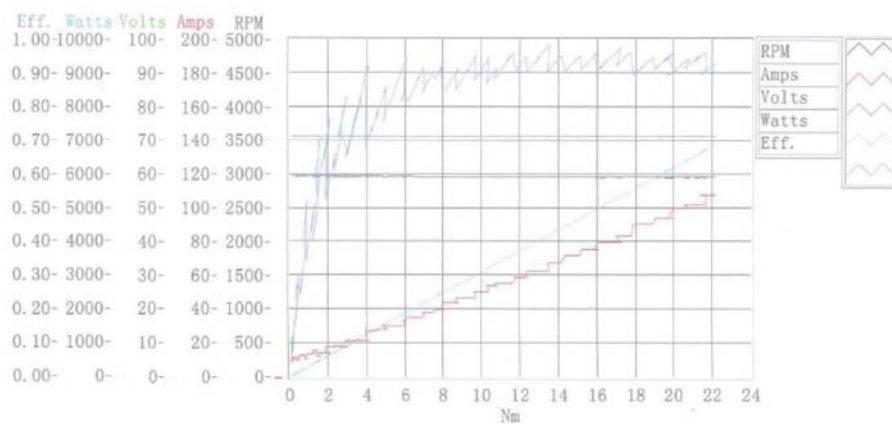


ME-MS1718 TECHNICAL SPECS

TECHNICAL SPECS

Type	RFPM Electric Motor (Brushless)
Operation Voltage	96-116 VDC
RPM Max.	8.000 rpm
Rated power	12 kW
Peak power	20 kW
Peak torque	65 Nm
Cooling	Air cooling system
Weight	21,4 kg

ME-MS1718 QUALITY CHECK GRAPHIC (<5000 RPM)



POWERED BY

MEF
Moto Engineering Foundation

TECHNOPARK
MOTORLAND

#TheRaceofEngineers



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est



CONTACT

All technical questions and requests about the ME-MS1718 Official Electric Motor must be directed to the MotoStudent Technical Department:

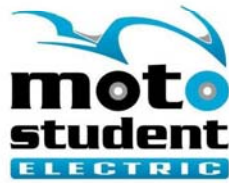
MotoStudent Technical Department - faq@motostudent.com

TechnoPark MotorLand 44600 - Alcañiz (Teruel) - Spain Tel. +34 978 877 935

www.motostudent.com

FOR MOTOSTUDENT USE ONLY

All the information reflected in this document is confidential and must not be distributed to third parties.



OFFICIAL MOTOR SUPPLIER

POWERED BY



#TheRaceofEngineers



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

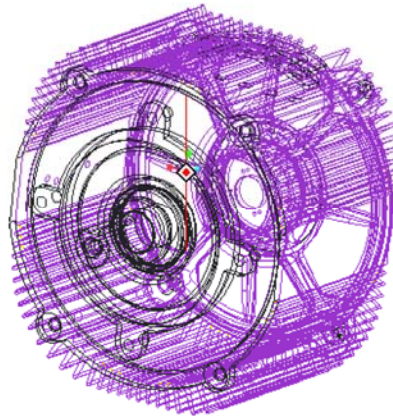


V International Competition MotoStudent

2017 - 2018



ME-MS1718 OFFICIAL ELECTRIC MOTOR
TECHNICAL SPECS – V2



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est



V INTERNATIONAL COMPETITION MOTOSTUDENT 2017-2018

ME-MS1718 OFFICIAL ELECTRIC MOTOR

Motenergy and MEF Technologies have developed the ME-MS1718, the Official Electric Motor for the V International Competition MotoStudent 2017-2018. All teams registered in the Category MotoStudent Electric will receive a unit of this motor within their MotoStudent Kit, compulsory to install in their prototypes.



GENERAL CONSIDERATIONS

The ME-MS1718 Official Electric Motor supplied will be sealed by the MotoStudent Organization to avoid internal manipulations, as reflects Art. D.2.1 of the Technical Regulations.

These seals will avoid the opening of the crankcases and covers, and must be intact at the moment of participation at the Final Event in Autumn 2018. These seals will be strictly checked at the Static Scrutineering.

ANY BROKEN OR DAMAGED SEAL WILL BE REASON FOR TECHNICAL NON-CONFORMITY

In case of breakdown or malfunction of any internal part, please contact the Organization to take the appropriate solution.

POWERED BY



#TheRaceofEngineers



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est



ME-MS1718 TECHNICAL SPECS

TECHNICAL SPECS

Type	RFPM Electric Motor (Brushless)
Operation Voltage	96-116 VDC
RPM Max.	8.000 rpm
Rated power	12 kW
Peak power	29 kW - 350A with 100 VDC Battery Supply 48 kW - 600A with 100 VDC Battery Supply
Peak torque	65 Nm
Cooling	Air cooling system
Weight	21,4 kg
Peak current	600 Arms
Continous current	157 Arms with forced air cooling
Continous torque	32 Nm
Max torque	120 Nm
Max temp	140°C
Ingress protection	IP65
Efficiency	92 %
Internal phase resistance at 25 °C	0,0027 Ω
Phase wire cross-section	2 AWG (12 wires in parallel, 1 mm diameter)
Temperature sensor	KTY84-130 Reference
Number of poles	10 units
Inductance	62-110 at 1000 Hz (μ H)
Voltage Constant	0,026 V/RPM
Torque Constant	0,22 Nm/Amp
Frequenzy	Variable
Rotor inertia	960 kg*cm ²
Air gap	2 mm

POWERED BY



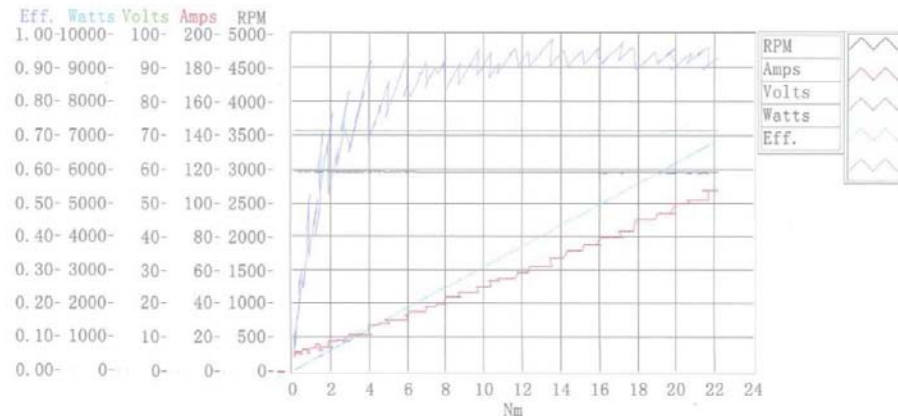
#TheRaceofEngineers



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est



ME-MS1718 QUALITY CHECK GRAPHIC (<5000 RPM)



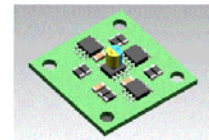
ENCODER - SENSOR DATA SHEET

ENCODER OVERVIEW

The encoder detects the magnet angle by a GMR sensor. It provides analog sine and cosine output voltage that describes the magnet angle in a range of 0 to 360°. The encoder is temperature compensated to maintain constant output voltage over a wide temperature and field range.

ENCODER FEATURES

- 3V to 5V operating supply voltage
- Low current consumption and very quick start up
- 360° contactless angle measurement
- Immune to airgap variations due to GMR based sensing principle
- Output amplitude constant over a wide temperature range:-40°C to 150 °C
- High accuracy typically 0.6°overall angle error



POWERED BY



#TheRaceofEngineers

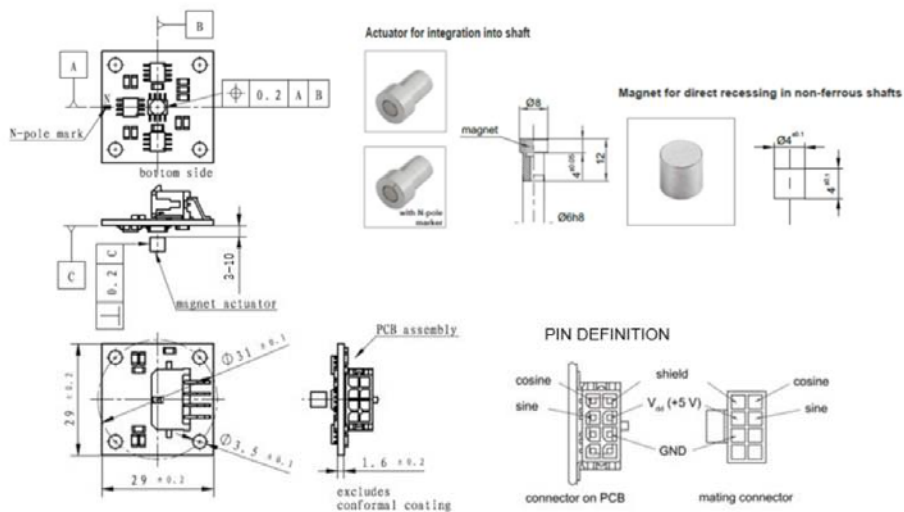
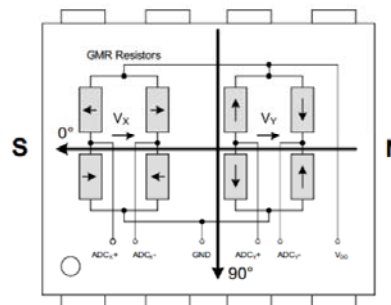


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

ENCODER FUNCTIONAL DESCRIPTION

The GMR sensor in the encoder is implemented using vertical integration. This means that the GMR sensitive areas are integrated above the analog portion of the sensor. These GMR elements change their resistance depending on the direction of the magnetic field:

- X component, V_x (cosine)
- Y component, V_y (sine)



POWERED BY

MEF
 Moto Engineering Foundation

TECHNOPARK
 MOTORLAND

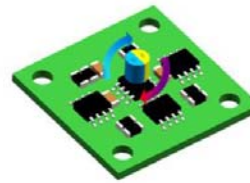
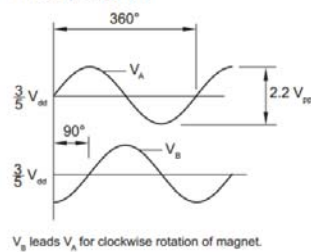
#TheRaceofEngineers



ENCODER PARAMETERS

Power supply	Vdd= 5 V \pm 5 %
Maximum speed	60,000 rpm
Resolution	One sine/cosine wave per revolution
Sin/Cos outputs	Signal amplitude: 1.1 V \pm 0.2 V
Power consumption	20mA
Accuracy	$\pm 0.6^\circ$
Hysteresis	1.62° at 30000 rpm

Timing diagram



POWERED BY

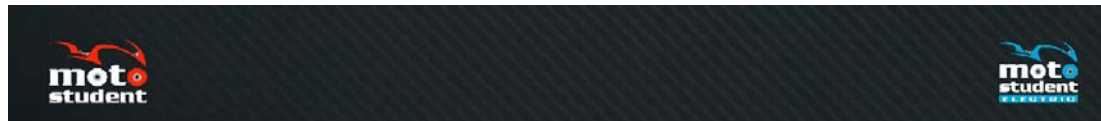
MEF
Moto Engineering Foundation

TECHNOPARK
MOTORLAND

#TheRaceofEngineers



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est



CONTACT

All technical questions and requests about the ME-MS1718 Official Electric Motor must be directed to the MotoStudent Technical Department:

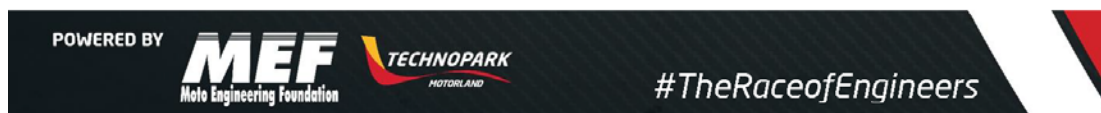
MotoStudent Technical Department - faq@motostudent.com

TechnoPark MotorLand 44600 - Alcañiz (Teruel) - Spain Tel. +34 978 877 935

www.motostudent.com

FOR MOTOSTUDENT USE ONLY

All the information reflected in this document is confidential and must not be distributed to third parties.



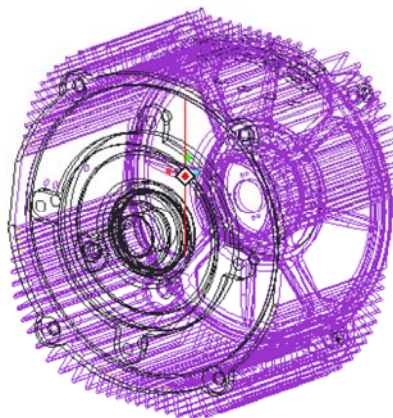


V International Competition MotoStudent

2017 - 2018



ME-MS1718 OFFICIAL ELECTRIC MOTOR TEST DATA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est



V INTERNATIONAL COMPETITION MOTOSTUDENT 2017-2018

ME-MS1718 OFFICIAL ELECTRIC MOTOR TEST

TEST CONDITIONS

The test was carried out under the following conditions:

- Battery Pack Rated Voltage: 104 VDC
- Battery Pack Capacity: 31,2 Ah
- Battery Pack Current: Limited by BMS to 320 A
- Voltage Drop in battery pack: 20 VDC at 300 A
- Torque values calculated by controller
- Sevcon Gen4 Size 6 Motor Controller

TEST RESULTS

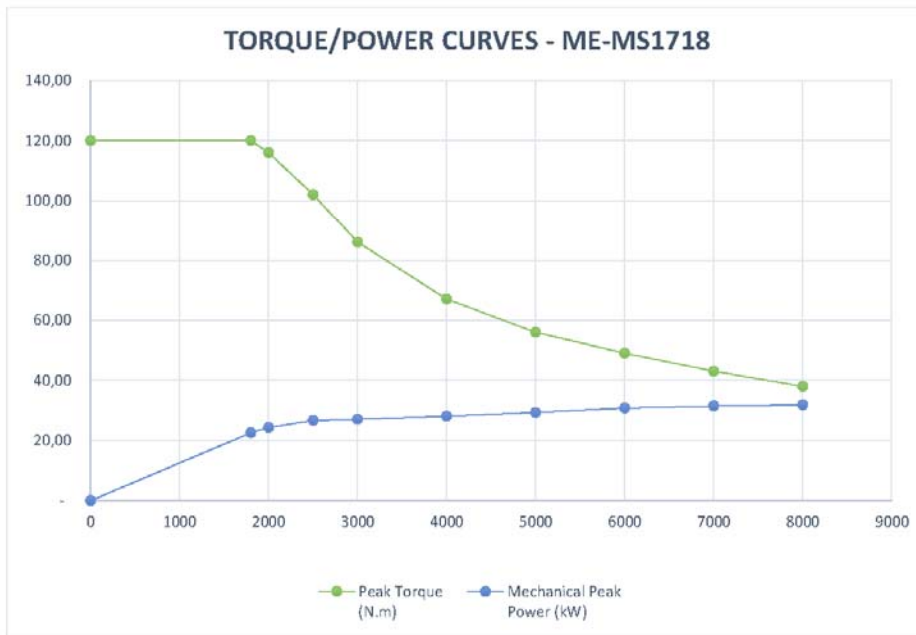
Motor Speed (RPM)	Peak Torque (N.m)	Mechanical Peak Power (kW)
0	120,00	-
1800	120,00	22,62
2000	116,00	24,29
2500	102,00	26,70
3000	86,00	27,02
4000	67,00	28,06
5000	56,00	29,32
6000	49,00	30,79
7000	43,00	31,52
8000	38,00	31,83

POWERED BY



#TheRaceofEngineers





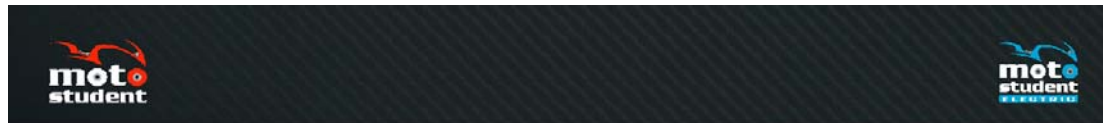
POWERED BY



#TheRaceofEngineers



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est



CONTACT

All technical questions and requests about the ME-MS1718 Official Electric Motor must be directed to the MotoStudent Technical Department:

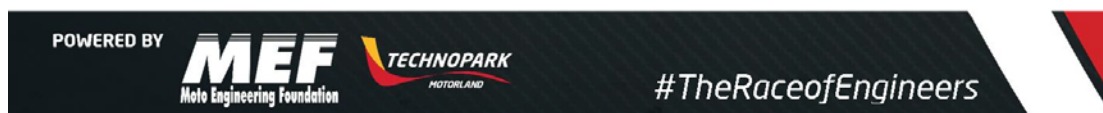
MotoStudent Technical Department - faq@motostudent.com

TechnoPark MotorLand 44600 - Alcañiz (Teruel) - Spain Tel. +34 978 877 935

www.motostudent.com

FOR MOTOSTUDENT USE ONLY

All the information reflected in this document is confidential and must not be distributed to third parties.



A2. Celdas



Albufera Energy Storage, S.L
 Parque Científico de Madrid - Campus de Cantoblanco
 C/ Faraday, 7 - 28049 Madrid-ESPAÑA
 Tel: +34 91 885 13 83 info@albufera-energystorage.com
 B-86696705

GTK P1190190S CELL SPECIFICATIONS

Cell brand	GTK
Model	P1190190S
Positive Material	Lithium Cobalt Oxide
Rated capacity	22 Ah
Minimum voltage	2.5 V
Nominal voltage	3.7 V
Maximum voltage	4.2 V
Dimensions	11x90x190 mm
Weight	<440 g
Initial internal resistance	< 3 mΩ
Cycle life (80% DOD)	>1200 cycles
Charge current	Standar: 0.2C (5A) / fast: 1C (22A)
Max. continuous discharge	18 C (400A)
Transient discharge peak	20 C (440A)
Operating charging temperature	0 to 45 °C
Operating discharging temperature	-20 to 70 °C
Storage temperature	-20 to 45 °C
Energy	81.4Wh
Energy density by weight	187 Wh/Kg
Energy density by Volume	433 Wh/L

Picture:



albufera Energy Storage
ALBUFERA ENERGY STORAGE S.L.
 C.I.F.: B-86696705
 Parque Científico de Madrid
 Campus de Cantoblanco
 C/ Faraday, 7 - 28049 Madrid
info@albufera-energystorage.com

* All specifications are subjected to change without notice.



Reg. Merc. Madrid, Tomo 31010, Folio 16, Secc. 8, Hoja M-558164, Inscripción 1ª - C.I.F.: B-86696705



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
 BARCELONATECH
 Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

A3. Inversor



Gen4

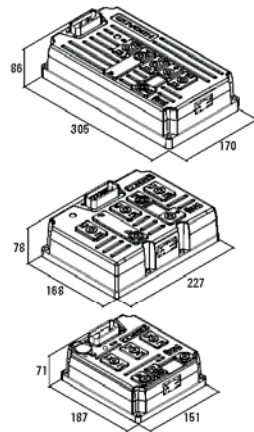
AC MOTOR CONTROLLER

The Gen4 range represents the latest design in compact AC Controllers. These reliable controllers are intended for on-road and off-road electric vehicles and feature the smallest size in the industry for their power capacity.

Thanks to the high efficiency it is possible to integrate these controllers into very tight spaces without sacrificing performance. The design has been optimised for the lowest possible installed cost while maintaining superior reliability in the most demanding applications.

FEATURES

- Advance flux vector control
- Autocheck system diagnostic
- Integrated logic circuit
- Hardware & software failsafe watchdog operation
- Supports both PMAC motor and AC induction motor control
- Integrated fuse holder
- IP66 protection



Gen4

KEY PARAMETERS

Model	Size 2	Size 4	Size 6	Size 8	Size 10	Size 12	Size 14	Size 16	Size 18	Size 20	Size 22	Size 24
Nominal Battery Voltage	24 VDC	24 to 36 VDC	36 to 48 VDC	48 to 60 VDC	60 to 72 VDC	72 to 84 VDC	84 to 96 VDC	96 to 108 VDC	108 to 120 VDC	120 to 132 VDC	132 to 144 VDC	144 to 156 VDC
Max operating voltage	34.8 VDC	52.2 VDC	69.6 VDC	87.0 VDC	104.4 VDC	121.8 VDC	139.2 VDC	156.6 VDC	174.0 VDC	191.4 VDC	208.8 VDC	226.2 VDC
Min. operating voltage	12.7 VDC	12.7 VDC	12.7 VDC	12.7 VDC	12.7 VDC	12.7 VDC	12.7 VDC	12.7 VDC	12.7 VDC	12.7 VDC	12.7 VDC	12.7 VDC
Peak Current (2min)	300A	400A	500A	600A	700A	800A	900A	1000A	1100A	1200A	1300A	1400A
Boost Current (10 sec)	300A	540A	780A	1020A	1260A	1500A	1740A	1980A	2220A	2460A	2700A	2940A
Cont. Current (60 min)	120A	180A	240A	300A	360A	420A	480A	540A	600A	660A	720A	780A

*Not yet available. Please contact Sevcon.

MULTIPLE MOTOR FEEDBACK OPTIONS

Gen4 provides a number of motor feedback possibilities from a range of hardware inputs and software control, allowing a great deal of flexibility.

- Absolute UVW encoder input
- Absolute Sin/Cos encoder input
- Incremental AB encoder input

INTEGRATED I/O

Gen4 includes a fully-integrated set of inputs and outputs (I/O) designed to handle a wide range of vehicle requirements. This eliminated the need for additional external I/O modules or vehicle controllers and connectors.

- 8 digital inputs
- 2 analogue inputs (can be configured as digital)
- 3 contactor/solenoid outputs
- 1 encoder supply output - programmable 5V or 10V

OTHER FEATURES

- A CANopen bus allows easy interconnection of controllers and devices such as displays and driver controls.
- The CANbus allows the user to wire the vehicle to best suit vehicle layout since inputs and outputs can be connected to any of the controllers on the vehicle and the desired status is passed over the CAN network to the relevant motor controller.
- The Gen4 controller can dynamically change the allowed battery current by exchanging CAN messages with a compatible Battery Management System.
- Configurable as vehicle control master or motor slave.

CONFIGURATION TOOLS

Sevcon offers a range of configuration tools for the Gen4 controller, with options for Windows based PC or calibrator handset unit. These tools provide a simple yet powerful means of accessing the CANopen bus for diagnostics or parameter adjustment. The handset unit features password protected access levels and a customized logo start-up screen.



SEVCON

Partner with Performance

Sevcon Ltd Kingsway South
Gateshead NE11 0QA England
T +44 (0)191 497 9000
sales.uk@sevcon.com

Sevcon Inc 155 Northboro Road
Southborough MA01772 USA
T +1 (508) 281 5500
sales.us@sevcon.com

Sevcon SAS Parc d'Activité
du Vert Galant Rue Saint Simon
St Ouen l'Aumône
95041 Cergy Pontoise Cedex France
T +33 (0)1 34 30 35 00
sales.fr@sevcon.com

Sevcon Japan K.K.
Kansai Office 51-26 Ohyabu Hikone
Shiga Japan 522-0053
T +81 (0) 7 49465766
jp.info@sevcon.com

Sevcon Asia Ltd
Room No.202 Dong-Ah Heights Bldg
449-1 Sang-Dong Wonmi-Gu
Bucheon City Gyeonggi-Do
420-816 Korea
T +82 32 215 5070
sales.kr@sevcon.com

Sevcon Germany
Hintere Str.32
73266 Bissingen an der Teck
Germany
T: +49 (0)170 9980294
E: de.info@sevcon.com

follow @Sevcon
www.sevcon.com



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TECH/OPS



Gen4 Application Note

Title	App Note - Gen4 Size 8 Beta cooling
Filename	App Note - Gen4 size 8 Beta cooling.docx
Date of Creation	20/06/2013 13:37:00 by Robert Taylor (from template)
Last Updated	04/07/2013 08:57:00 by Robert Taylor
Revision	5

Contents	
1. Introduction	2
2. Overview of Cooling Strategy	3
3. Application Scenarios	6

Sevcon Ltd
IVTE
Gateshead
Tyne & Wear
England NE11 0QA

Tel +44 (0)191 4979000
Fax +44 (0)191 4824223
www.sevcon.com

Commercially confidential You are authorised to open and view any electronic copy we send you of this document within your organisation and to print a single copy. Otherwise the material may not in whole or in part be copied, stored electronically or communicated to third parties without the prior written agreement of Sevcon Limited.

1. Introduction

1.1. Purpose and Scope

The purpose of this document is to describe the strategy for management of heat losses in the Gen4 Size 8 Beta inverter. In this document "the inverter" means the Gen4 Size 8 Beta 3 product from Sevcon.

1.2. Related documents

List all documents referenced by and relevant to this document.

R e f	Doc Ref	Title	Origin	Revision
1				
2				

Table 1. Related Documents

1.3. Document Conventions

This section shall define any typographical conventions used in this document.




Typeface	Indicates
 WARNING	Very important information for the document user. Use this to indicate instructions or constraints the document user must comply with to prevent serious problems.
 CAUTION	Important information for the document user. Use this to indicate instructions or constraints the document user must comply with to prevent undesirable problems.
 NOTE	Useful information for the document user.

Table 2. Typographical Conventions

1.4. Glossary

This section shall define terms, acronyms and abbreviations used in this document.

Term	Description

Table 3. Glossary

1.5. Document Evolution

If changes are required to be made to this document, they will be made to the master copy located in the Sevcon SharePoint database.

2. Overview of Cooling Strategy

Gen4 Size 8 is a 3-phase inverter with maximum dc input supply rating 400V 300A and output rating 300Arms for use with various types of AC motor including Permanent Magnet AC (PMAC) and Induction Motor (IM). A short-term overload (for a few seconds, depending on temperature) to 400Arms is available. The inverter uses IGBTs to convert input power to output power according to the torque demands for the vehicle.

The maximum rating achievable depends on various environmental conditions including:

- Ambient temperature of air and surfaces where the inverter is located
- Liquid cooling system: including coolant type, flow rate and inlet temperature
- The duty cycle of the output power

The inverter software will reduce the maximum available torque output (and therefore current output) if the actual or estimated temperatures of some inverter components exceed the defined thresholds for each component. These are shown in Table 4.

Table 4: Cutback sources and associated cutback temperatures

Cutback source	Cutback start temperature (°C)	Temperature corresponding to zero torque (°C)
Actual IGBT baseplate temperatures (T _{base})	100	110
Estimated IGBT junction temperatures (T _j)	145	155
Estimated DC link capacitor temperatures (T _{cap})	110	120
Estimated internal track temperature (T _{track})	110	120

If any of these three cutback sources exceeds its particular temperature threshold then the available torque will start to be reduced. If any cutback source exceeds its threshold by 10 degC or more, then the available torque will be reduced to zero.

The relationship between the available torque and the temperature excess of a cutback source above its threshold is shown in Figure 1. The data points are given in Table 5.

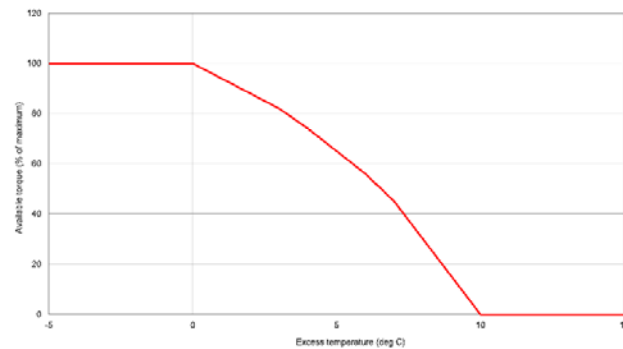


Figure 1: Cutback curve (available torque v. excess temperature)

Excess temperature above start-of-cutback (degC)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Allowed torque (%)	100	94	88	82	74	65	56	45	30	15	0

Table 5: Available torque v. excess temperature (data for Figure 1)

App Note - Gen4 Size 8 Beta cooling

The temperatures reached by the IGBT baseplate and T_j estimates for a particular output current are heavily influenced by the coolant inlet temperature and flow rate. The short-term rating of the inverter (during about the first 1 minute of operation at 300A) is limited mainly by the need to limit the IGBT junction and baseplate temperatures.

The DC link capacitor temperature estimate is influenced about equally by the ambient temperature around the inverter and the IGBT baseplate temperature. The long-term rating of the inverter (during about the first 15 minutes or more of operation at constant load) is mainly limited by the need to limit the DC link capacitor temperature. Thus, ambient temperature has more effect on the long-term and continuous rating than it does on the short-term rating.

2.1. Ambient temperature of inverter location

The allowable ambient temperature range in the location of the inverter is -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$. This applies to the air surrounding the inverter and surfaces in contact with the inverter.

2.2. Liquid cooling system

2.2.1. General

The inverter may be attached to a liquid cooling system. The coolant may be a water-glycol mixture or it may be Opticool (a synthetic mineral oil with low viscosity). Water-glycol gives significantly better results than oil.

2.2.2. Coolant flow rate

Water-glycol at a flow rate of at least 5 litre/min is recommended.
If Opticool oil is to be used, a flow rate of at least 8 litre/min is recommended.
Performance will be improved by using a higher flow rate.

2.2.3. Pressure Drop vs. Coolant Flow

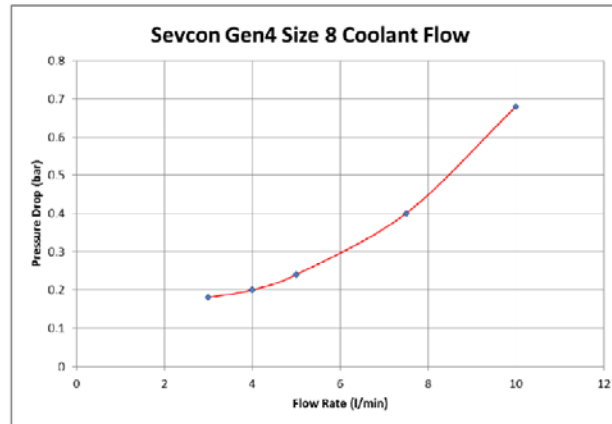


Figure 2: Pressure drop v. flow rate (water-glycol)

The graph shown above is measured data using circa 2m of hose in laboratory conditions.

2.3. Coolant inlet temperature

The maximum coolant inlet temperature shall not exceed 65°C .

2.4. Ambient temperature of air outside the vehicle

The ambient temperature of the air outside the vehicle affects the capability of the heat-exchanger to cool the coolant before it is fed back into the inverter.

App Note - Gen4 Size 8 Beta cooling



2.5. Duty cycle of the output power.

In general the Gen4 Size 8 inverter is specified for two rating conditions: a single power pulse at 300A (rms) at a frequency above 20Hz, and at continuous power. See Section 3 "Application Scenarios" for details. For other duty cycles, consult Sevcon.

2.6. Stall Condition

The stall condition in PMAC motors causes particular stress on the inverter power devices because in this condition one out of the 6 power devices has significantly increased heat losses. A software change is being introduced to improve the output current rating of the product under low output frequency conditions.

Page 5 of 9



3. Application Scenarios



NOTE: Figure 3 and Figure 6 show inverter ratings based on calculation of the IGBT temperatures. The continuous current rating for these Application Scenarios is limited by other factors – see Table 6 and Table 8.

3.1. DC Supply 175V, 40°C ambient

Gen4 Size 8 inverter, water-glycol coolant	
Conditions of operation	
DC supply voltage:	175V
Ambient temperature:	40°C
Coolant inlet temperature:	40°C
Coolant type:	Water-glycol 50-50 mixture
Coolant flow rate:	2.5 litre/minute (lpm)
Output frequency:	> 20Hz
Ratings	
400A	for 45s
300A	For 200s
220A	Continuous
(limited by capacitor temperature)	
Coolant circuit characteristics with these conditions of operation	
Pressure drop, inlet to outlet:	< 200mbar (10kPa)
Coolant temperature rise, inlet to outlet, 200A continuous:	9 degC

Table 6: Inverter rating for application scenario 1

Gen4 Size 8 inverter, Opticool coolant	
Conditions of operation	
DC supply voltage:	175V
Ambient temperature:	40°C
Coolant inlet temperature:	40°C
Coolant type:	Opticool oil
Coolant flow rate:	8 litre/minute (lpm)
Output frequency:	> 20Hz
Ratings	
400A	for 30s
300A	for 100s
200A	Continuous
Coolant circuit characteristics with these conditions of operation	
Pressure drop, inlet to outlet:	To be determined
Coolant temperature rise, inlet to outlet, 200A continuous:	6 degC

Table 7: Inverter rating for application scenario 2

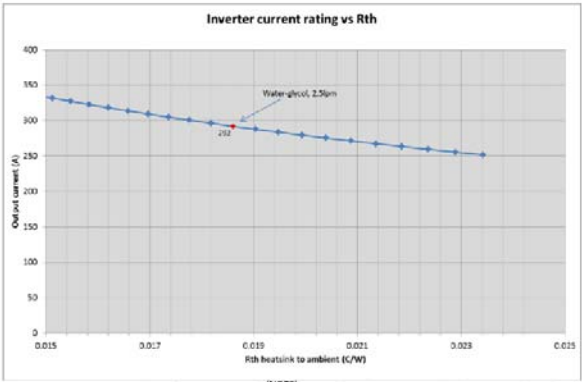


Figure 3: Inverter rating due to IGBTs ^{at(NOTE)} - Application scenario 1 (water glycol)

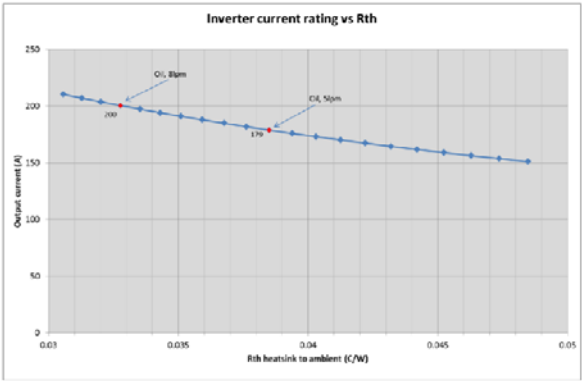


Figure 4: Inverter continuous current rating - Application scenario 2 (oil)

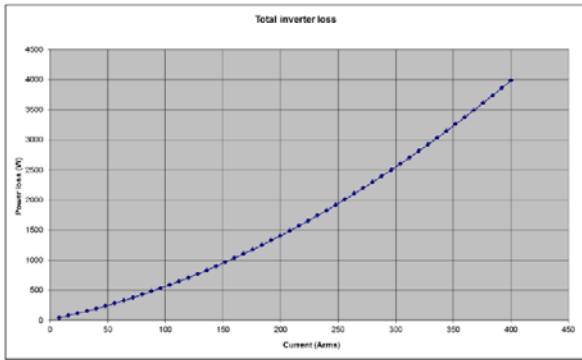


Figure 5: Inverter total power losses - Application scenarios 1 & 2 (175V)

App Note - Gen4 Size 8 Beta cooling



3.2. DC Supply 300V, 25°C ambient

Gen4 Size 8 inverter, water-glycol coolant	
Conditions of operation	
DC supply voltage:	300V
Ambient temperature:	25°C
Coolant inlet temperature:	25°C
Coolant type:	Water-glycol 50-50 mixture
Coolant flow rate:	2.5 litre/minute (lpm)
Output frequency:	> 20Hz
Ratings	
400A	for 10s
300A	for 120s
190A	Continuous
(* limited by capacitor temperature)	
Coolant circuit characteristics with these conditions of operation	
Pressure drop, inlet to outlet:	< 200mbar (10kPa)
Coolant temperature rise, inlet to outlet, 200A continuous:	11 degC

Table 8: Inverter rating for application scenario 3

Gen4 Size 8 inverter, Opticool coolant	
Conditions of operation	
DC supply voltage:	300V
Ambient temperature:	25°C
Coolant inlet temperature:	25°C
Coolant type:	Opticool oil
Coolant flow rate:	8 litre/minute (lpm)
Output frequency:	> 20Hz
Ratings	
400A	for 10s
300A	for 60s
160A	Continuous
Coolant circuit characteristics with these conditions of operation	
Pressure drop, inlet to outlet:	To be determined
Coolant temperature rise, inlet to outlet, 200A continuous:	8 degC

Table 9: Inverter rating for application scenario 4

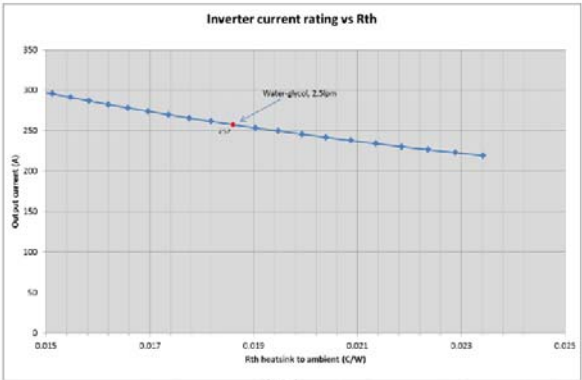


Figure 6: Inverter rating due to IGBTs ^{at(NOTE)} - Application scenario 3 (water glycol)

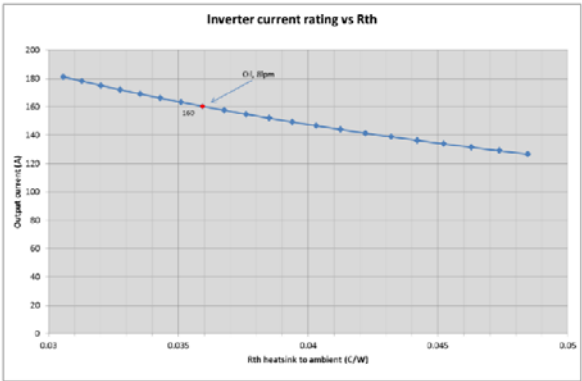


Figure 7: Inverter continuous current rating - Application scenario 4 (oil)

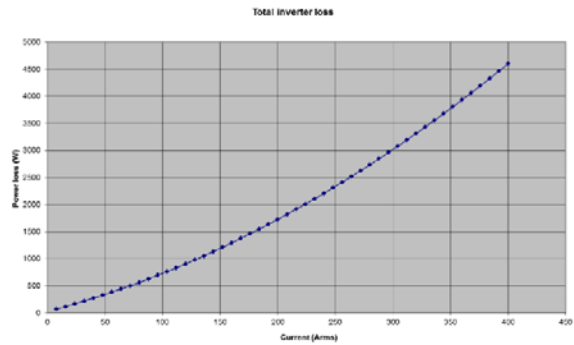
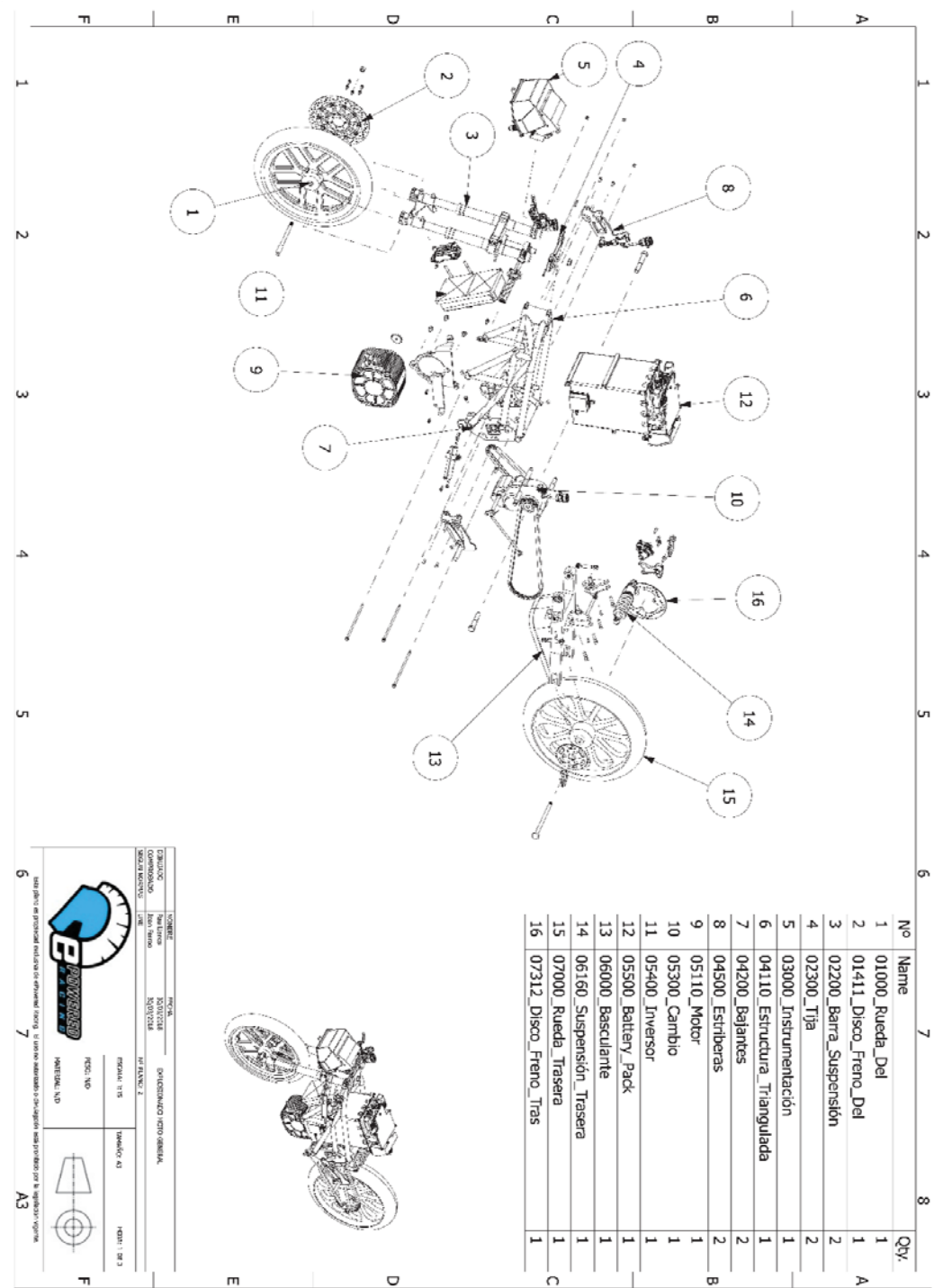


Figure 8: Inverter total power losses - Application scenarios 3 & 4 (300V)

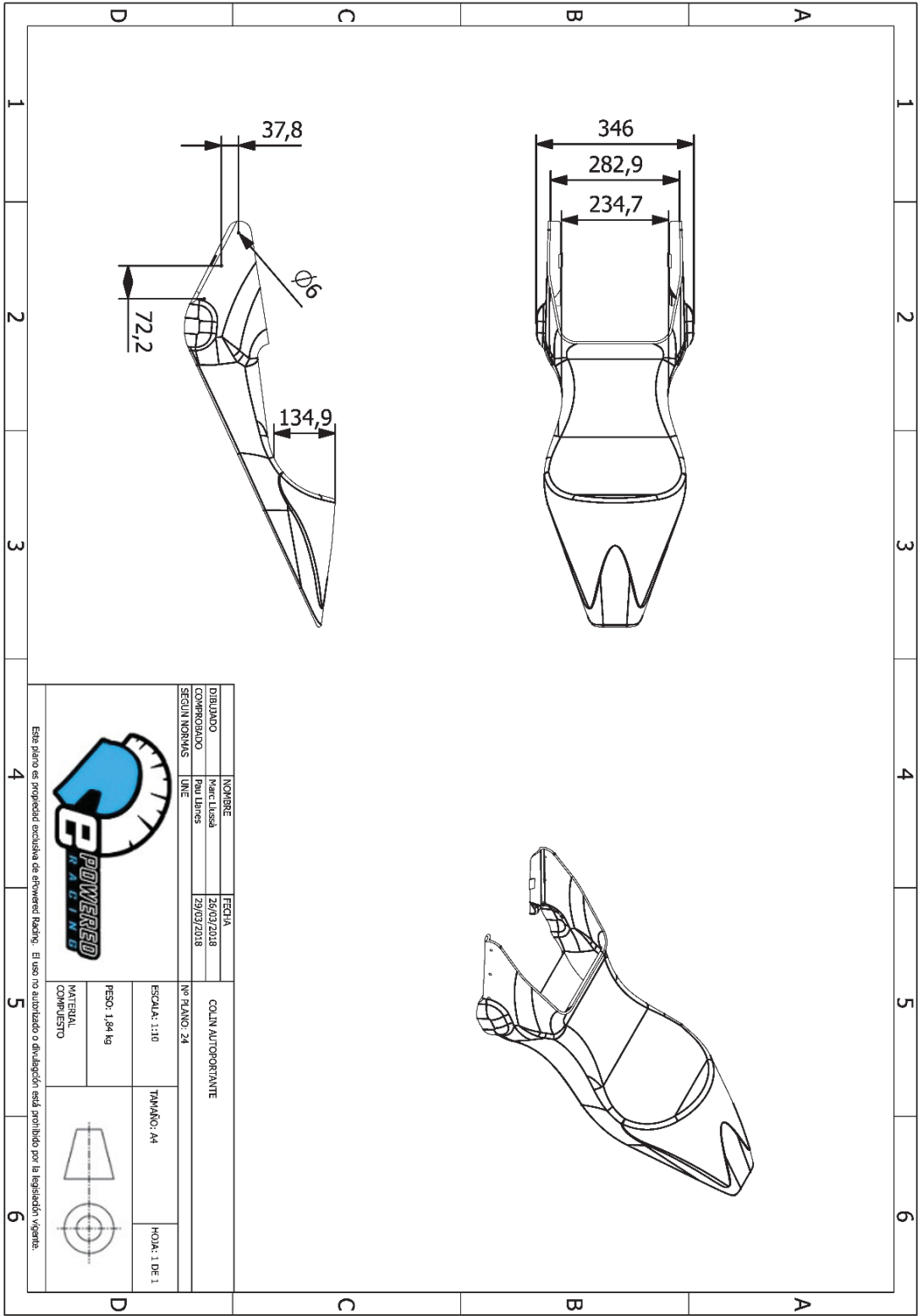
End of Application Note.

Anexo B: Planos

B1. Moto General



B2. Colín



B3. Comprobación de Cotas

